

CAP 1

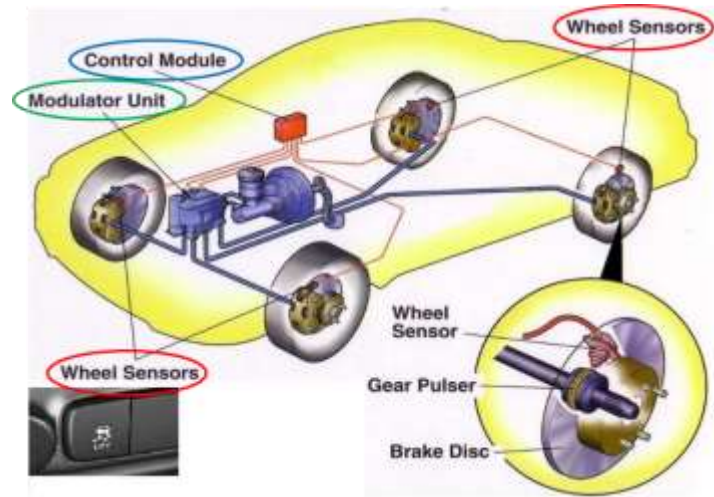
INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE CONTROLE

SUMÁRIO

1.1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.1.	BREVE HISTÓRIA DA INDUSTRIALIZAÇÃO.....	1
1.2.	TEORIA DE CONTROLE.....	2
1.3.	TERMINOLOGIA BÁSICA.....	2
1.4.	MODELO ESQUEMÁTICO DE SISTEMAS DE CONTROLE.....	3
1.5.	DIAGRAMA DE BLOCOS CONCEITUAL DE SISTEMAS DE CONTROLE.....	5
1.6.	EXERCÍCIOS RESOLVIDOS.....	5
1.7.	RESUMO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE.....	7
1.8.	RESUMO DA TRANSFORMADA Z.....	9
1.9.	MATLAB.....	10
1.10.	PYTHON.....	10
1.11.	LISTA DE EXERCÍCIOS.....	11

1.1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de controle automático são essenciais ao avanço da engenharia, integrando o funcionamento dos sistemas (elétricos, mecânicos, químicos, econômicos, biológicos etc.) de maneira inteligente. Os Sistemas de Controle são sistemas que possuem as capacidades de **sentir** (Sensores), **decidir** (Controladores) e **fazer** (Atuadores) sem a necessidade de intervenção humana.

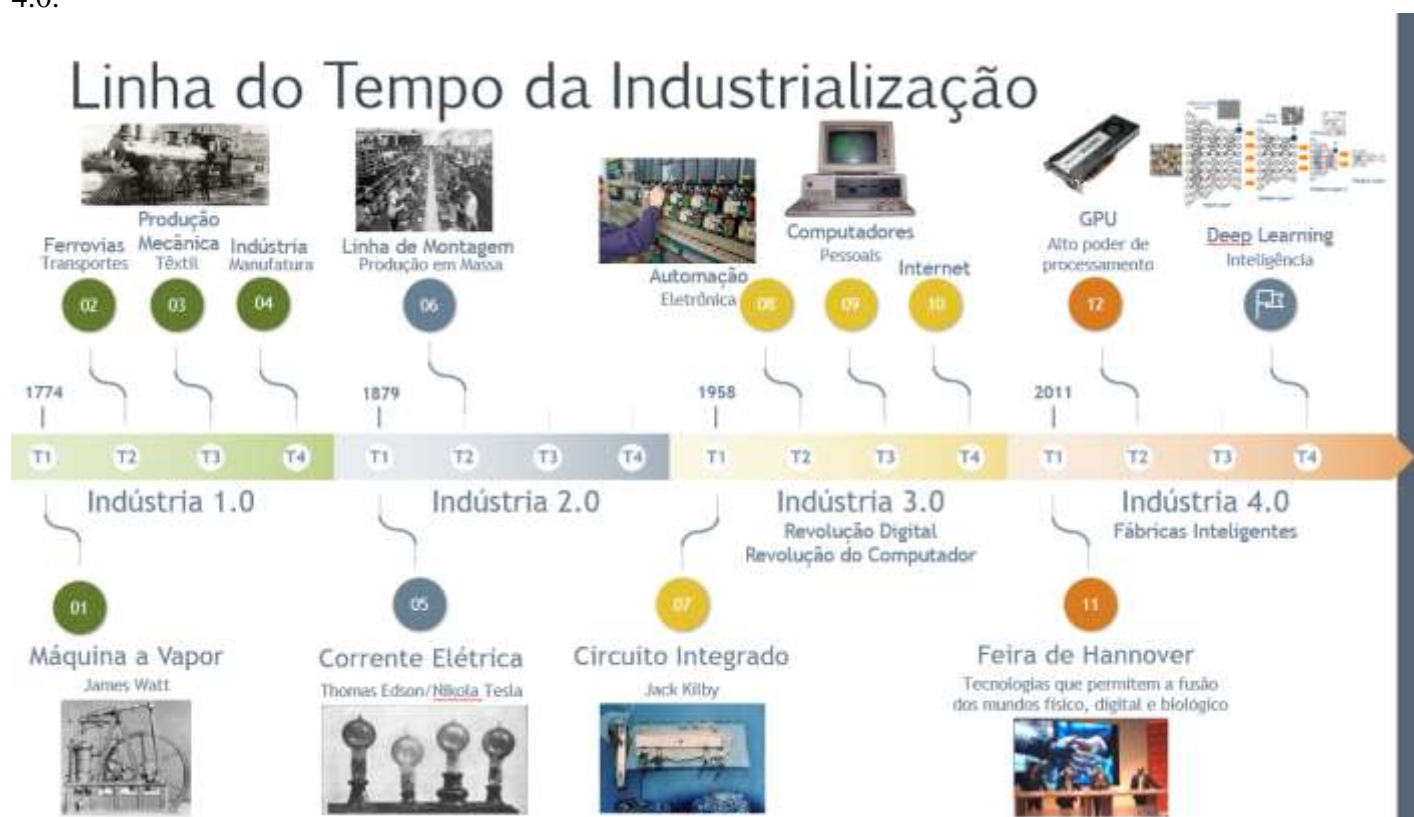


Sistema antiderrapagem de um veículo

São exemplos de sistemas de controle: piloto automático em aviões, equipamentos de monitoramento e ação das diversas variáveis de um processo industrial, marca-passo do coração etc.

1.1.1. BREVE HISTÓRIA DA INDUSTRIALIZAÇÃO

Na Feira de Hannover (2011), evento de tecnologia que ocorre anualmente na Alemanha, os estudiosos do processo de industrialização definiram uma nova categorização dos períodos de avanço do desenvolvimento industrial na história, criando a linha do tempo da industrialização, conforme mostrado na figura abaixo, em que são definidas quatro fases distintas do desenvolvimento industrial, nomeadas de Indústria 1.0 até a Indústria 4.0.



O início do processo de industrialização remonta aos anos de 1760 a 1840, aproximadamente, e teve sua maior expressão com a invenção da máquina à vapor, em 1774, por James Watt. A máquina à vapor permitiu o desenvolvimento da produção, principalmente nos segmentos de transporte (ferrovias), têxtil e de manufaturas. Esta fase caracteriza a chamada Indústria 1.0.

Com a descoberta da corrente elétrica por Nikola Tesla e Thomas Edison em 1879, teve início a chamada Indústria 2.0 onde se fazia o uso de motores elétricos e de iluminação artificial para a produção em massa (as chamadas linhas de montagem).

Em 1959, com a invenção do circuito integrado por Jack Kilby tem-se o início da Indústria 3.0 com o surgimento da automação eletrônica, seguida pela criação dos computadores e a internet. Esta fase também é chamada de Revolução Digital (ou Revolução do Computador).

A partir de 2011 teve início a era das Fábricas Inteligentes, também chamada de Indústria 4.0, com o uso de tecnologias de Inteligência Artificial aplicada aos processos industriais que teve grande impulso devido à criação de *hardwares* de alto poder de processamento (as denominadas GPUs).

1.2. TEORIA DE CONTROLE

A teoria de controle surge já na Indústria 1.0, com os sistemas realimentados para controle de velocidade das máquinas a vapor, e suas teorias vem sendo desenvolvidas para uma série de aplicações industriais. Essa teoria aborda diferentes formas de lidar com sistemas dinâmicos baseando-se na natureza e nas características desses sistemas. Assim, é possível classificar os diferentes tipos de controle dentro da teoria como sendo:

- **Controle Clássico:** É o ramo da teoria de controle que lida com o comportamento de sistemas dinâmicos por entradas e realimentação.
- **Controle Analógico:** Usa de sinais e de sistemas analógicos.
- **Controle Digital (Discreto):** Usa de sinais e de sistemas discretos ou digitais.
- **Controle Robusto:** É o ramo da teoria de controle que lida com sistemas que exigem exatidão e tolerância à falhas.
- **Controle Ótimo:** Lida com a operação de um sistema dinâmico baseando as ações em custos.
- **Controle Inteligente:** Utiliza modelos de inteligência de máquina.
- **Controle Não-Linear:** Lida com controle de sistemas não-lineares.
- **Controle Adaptativo:** Faz uso de modelos que se adaptam às mudanças do sistema dinâmico.
- **Controle Preditivo:** Lida com modelos de previsão de comportamento e/ou de variáveis de um sistema dinâmico.

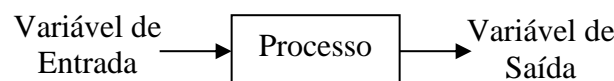
O estudo da Análise e modelagem de Sistemas Dinâmicos abordado aqui será dentro da Teoria Clássica de Controle abordando os sistemas de Controle Analógico e Digital.

1.3. TERMINOLOGIA BÁSICA

Sistema: É uma combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. Ex: computador, ar-condicionado, sistema nervoso etc.

Sistema a Controlar (ou Planta): É qualquer objeto físico a ser controlado. Ex: um forno, um reator, um avião, sistema circulatório etc.

Processo: É toda operação a ser controlada. Ex: altura do avião, porta do forno, batimentos cardíacos etc.

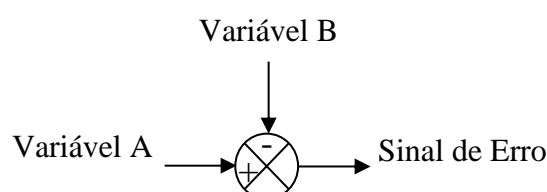


Variável Manipulada (ou Sinal de Controle ou Entrada de Controle ou Setpoint): É a grandeza ou condição que é modificada pelo controlador de modo que afete a variável controlada. Ex: posição do acelerador do carro.

Variável Controlada (normalmente é a Saída do Sistema): É a grandeza ou condição que é medida e controlada no processo. Ex: velocidade do carro.

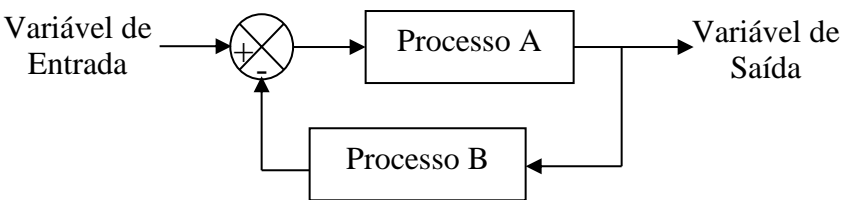
Variável de Entrada: É toda variável que é recebida pelo sistema de controle. Normalmente são as variáveis manipuladas e os distúrbios externos.

Sinal de Erro: Resultado da comparação na operação de realimentação.



$$\text{Sinal de Erro} = \text{Variável A} - \text{Variável B}$$

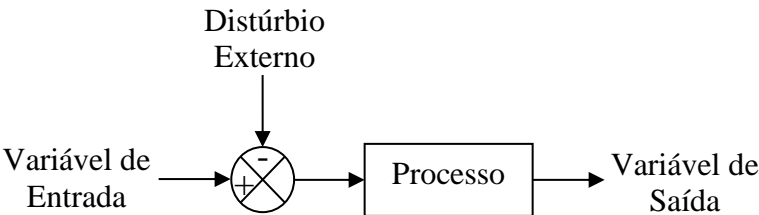
Realimentação: É uma operação que estabelece uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência.



Sistemas de Malha Fechada: São sistemas de controle que possuem realimentação.
Sistemas de Malha Aberta: São sistemas de controle que não possuem realimentação.

MALHA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
ABERTA	<ul style="list-style-type: none">• Simples de ser construído.• Fácil manutenção.• Mais baratos.• Menor número de componentes.• Não apresentam problemas de estabilidade.	<ul style="list-style-type: none">• Não pode ser usado em sistemas susceptíveis a distúrbios e/ou alterações não previstas nos componentes do sistema.• Necessária regulagem periódica.
FECHADA	<ul style="list-style-type: none">• Resposta do sistema é relativamente insensível aos distúrbios e variações internas nos parâmetros do sistema.• Pode estabilizar um sistema.	<ul style="list-style-type: none">• Maior custo de implantação.• Controle da estabilidade é mais elaborado.

Distúrbio: É um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema.
Distúrbio Interno: É um distúrbio gerado dentro do sistema. Ex: ruído térmico em sistemas eletrônicos.
Distúrbio Externo: É um distúrbio gerado fora do sistema e que se comporta como um sinal de entrada no sistema. Ex: ruído eletromagnético em sistemas de radiocomunicação, atrito por desgaste, carga sobre o eixo de um motor etc.



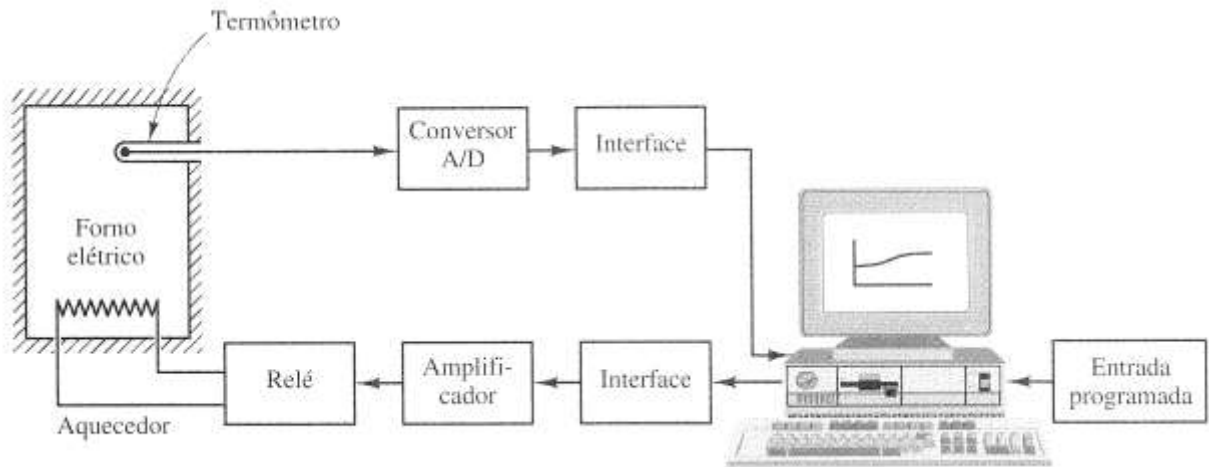
Graus de Liberdade do Processo: É a resposta do conjunto de equações utilizadas para representar o processo completamente. Também pode ser obtido por:

$$\text{Grau de Liberdade do Processo} = n^{\circ} \text{ de Variáveis Independentes} - n^{\circ} \text{ Equações Dinâmicas}$$

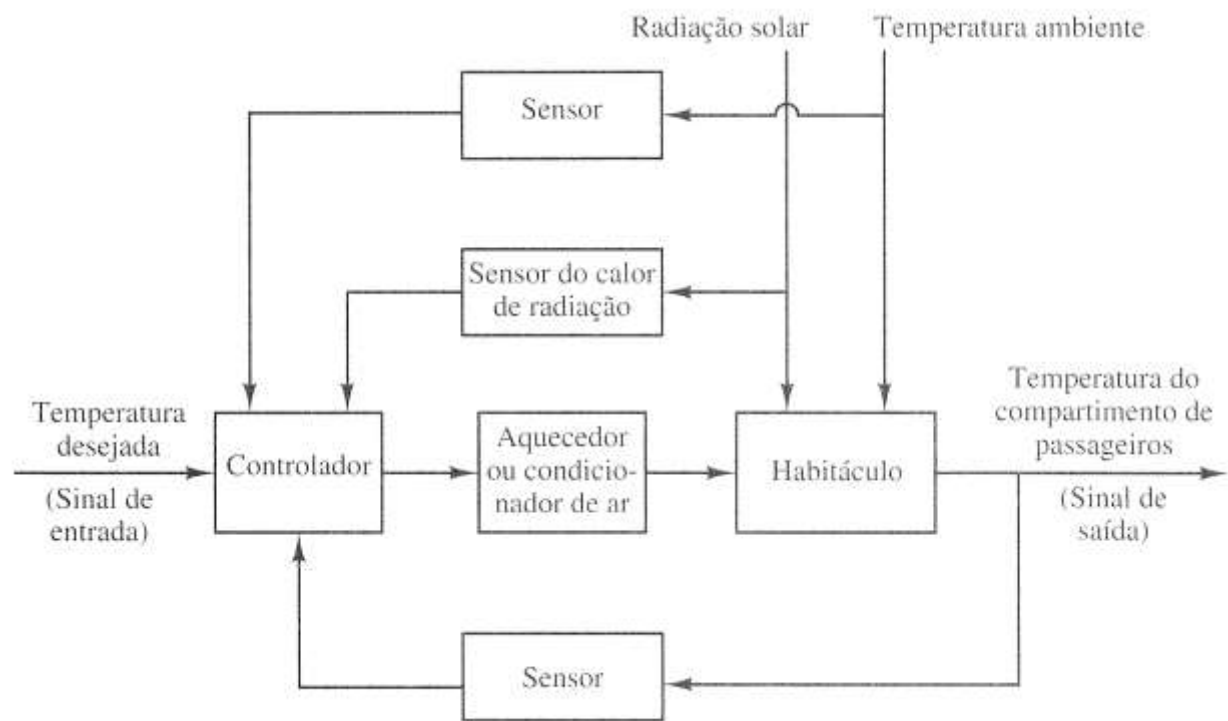
Graus de Liberdade do Controle: É o número de variáveis que podem ser controladas de forma independente.

1.4. MODELO ESQUEMÁTICO DE SISTEMAS DE CONTROLE

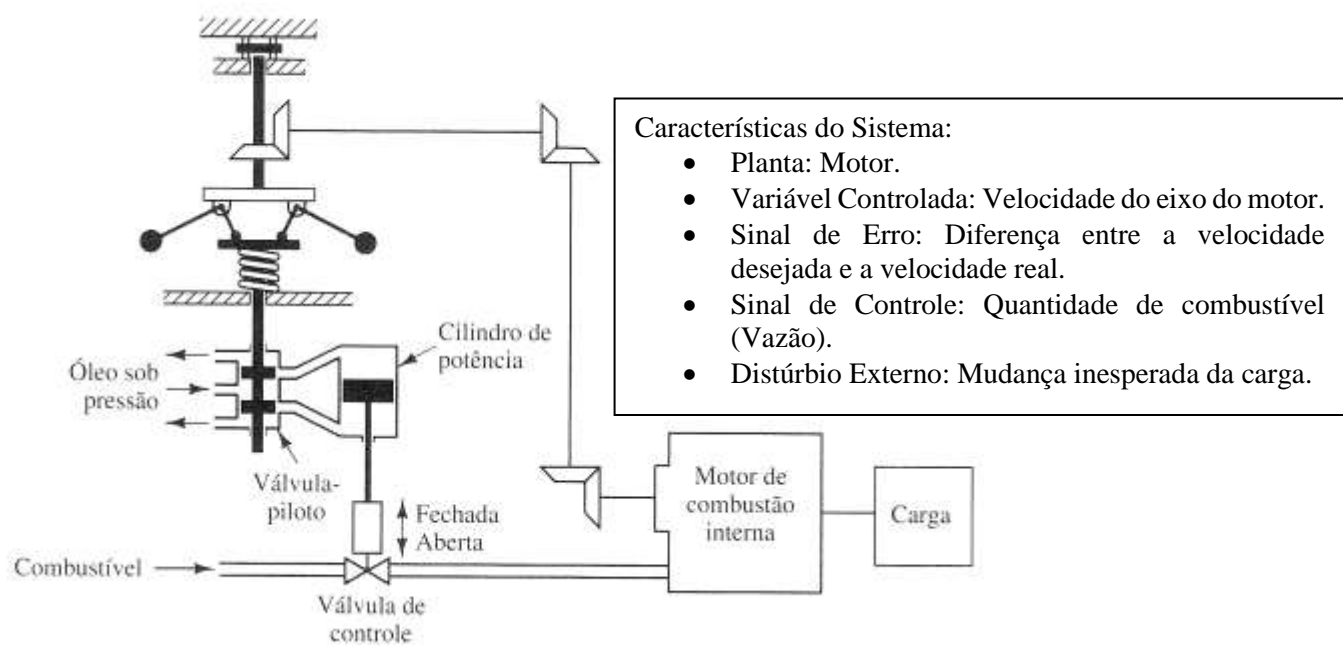
Tem por objetivo esboçar um sistema na forma com que estabelecem suas conexões aos elementos que o compõe. Aqui não há a preocupação direta em relacionar as grandezas físicas que estão associadas a cada elemento do esboço, mas apenas apresentar como os elementos podem estar conectados com objetivo de se estabelecer uma rede de controle.



Sistema A – Forno Elétrico



Sistema B – Automóvel



SISTEMA C – Injeção de combustível ao motor de combustão interna

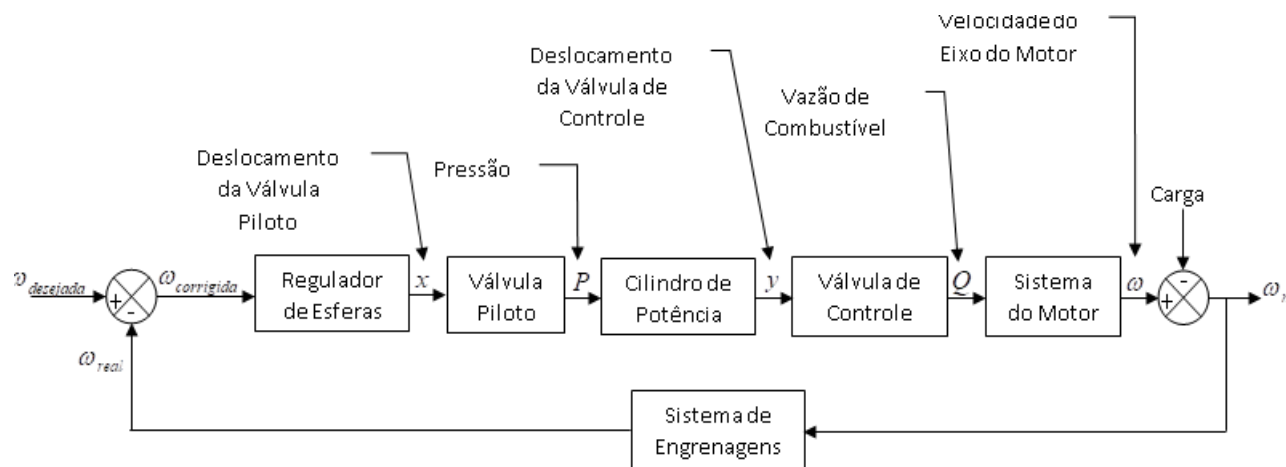
Dispositivo: Regulador de Esferas (*Centrifugal Governor*)



A rotação das esferas faz com que elas se afastem deslocando uma haste deslizante, em torno do eixo de rotação, na vertical. Assim, a velocidade de rotação das esferas atua no deslocamento da haste para cima ou para baixo.

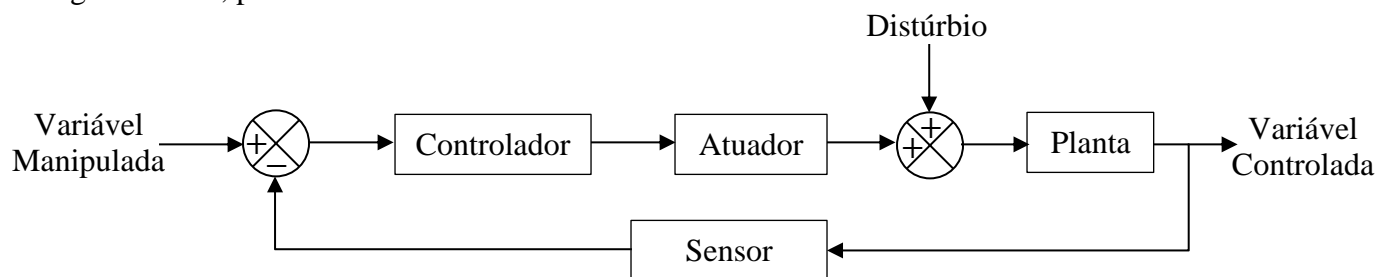
1.5. DIAGRAMA DE BLOCOS CONCEITUAL DE SISTEMAS DE CONTROLE

Tem por objetivo esquematizar um sistema relacionando as grandezas físicas que estão associadas a cada elemento do diagrama. O diagrama conceitual abaixo é referente ao sistema de injeção de combustível ao motor de combustão interna esquematizado na seção anterior.



1.6. EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

A solução dos exercícios deste capítulo deve implementar as capacidades de **sentir** (Sensores), **decidir** (Controladores) e **fazer** (Atuadores), resultando, de forma genérica, em sistemas com representações similares à da figura abaixo, podendo haver ou não distúrbios.

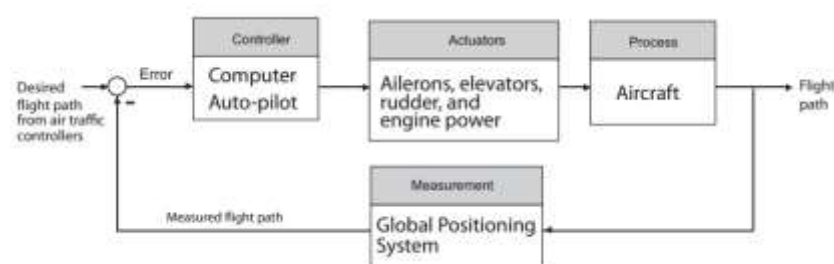


Exemplo 1 – Atualmente, os engenheiros estão desenvolvendo sistemas de controle de tráfego aéreo e sistemas que auxiliam o tráfego de aeronaves utilizando os satélites de navegação do Sistema de Posicionamento Global (GPS). O GPS permite a cada avião saber, de forma precisa, sua posição. Esboce um diagrama de blocos retratando como o piloto automático pode utilizar o GPS para conduzir a aeronave até seu destino.

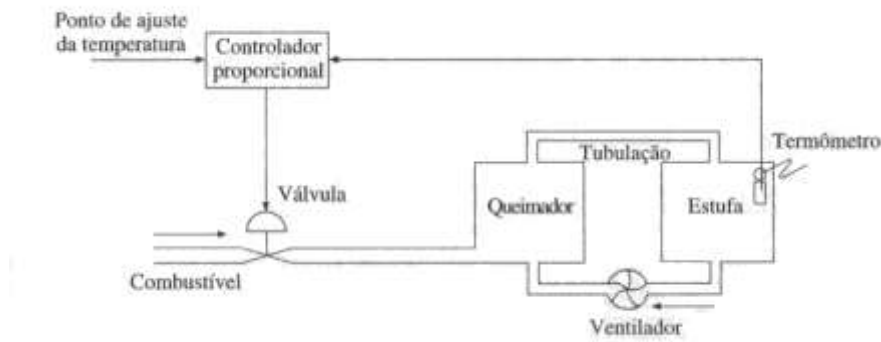
- Informe se o sistema é de malha aberta ou de malha fechada. Explique.
- Informe qual é a planta.
- Informe qual (quais) a(s) entrada(s) do sistema.
- Informe qual (quais) a(s) variável (variáveis) controlada(s).
- Informe qual (quais) a(s) variável (variáveis) manipulada(s).
- Esboce um diagrama de blocos conceitual desse sistema de controle.

SOLUÇÃO

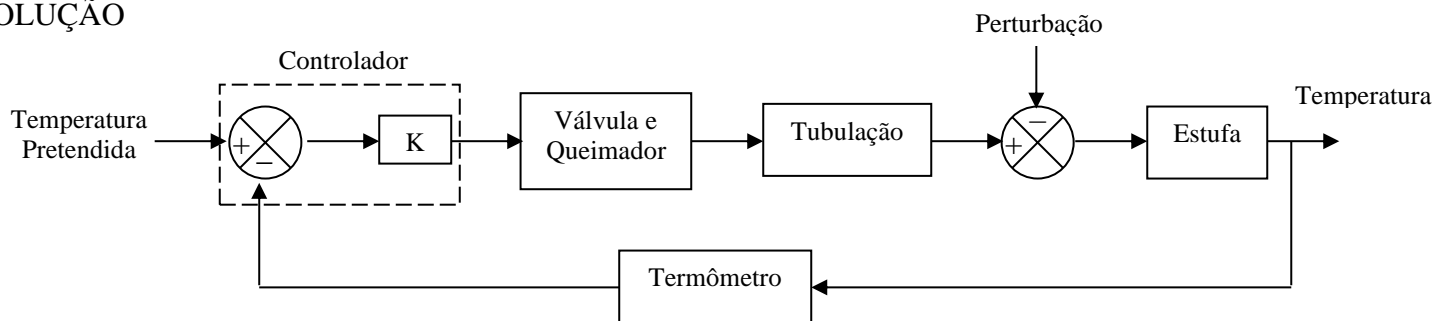
- Malha Fechada, pois a posição da aeronave é comparada e corrigida a todo tempo.
- A Aeronave.
- É a rota desejada (trajetória).
- Trajetória de voo.
- Posições das superfícies de voo.
- Diagrama:



Exemplo 2 – Elabore o diagrama de blocos do sistema de controle de temperatura de uma estufa conforme esquema abaixo. O ventilador força o ar quente a passar pela estufa afetando a sua temperatura. Considere o abrir e fechar da porta da estufa para seu uso como perturbações inseridas no sistema.



SOLUÇÃO

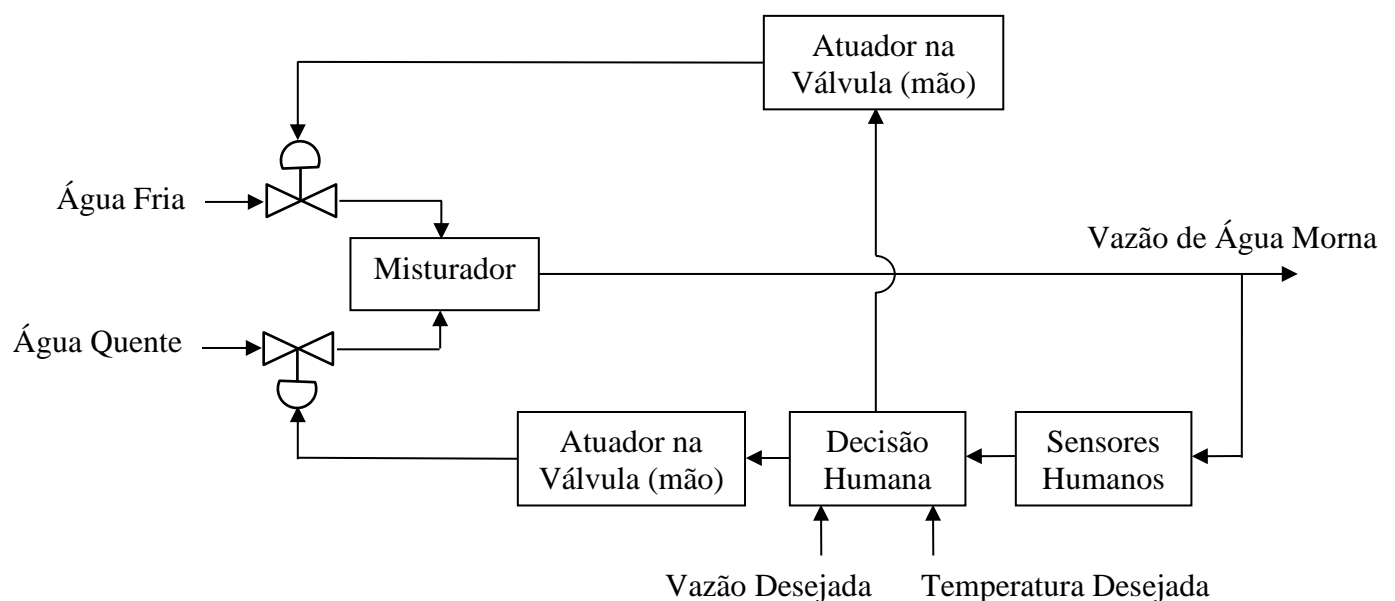


Exemplo 3 – (DORF P1.13 Modificado) Um exemplo comum de sistema de controle com duas entradas é o chuveiro doméstico com válvulas separadas para água quente e fria. O objetivo é obter (1) a temperatura desejada da água do chuveiro e (2) um fluxo de água desejado. Para esse sistema faça o seguinte:

- Informe se o sistema é de malha aberta ou de malha fechada. Explique.
- Informe qual (quais) a(s) entrada(s) de controle.
- Informe qual (quais) a(s) saída(s) do sistema.
- Informe qual (quais) a(s) variável (variáveis) controlada(s).
- Informe qual (quais) a(s) variável (variáveis) manipulada(s).
- Esboce um diagrama de blocos conceitual desse sistema de controle.

SOLUÇÃO

- Malha Fechada, pois a temperatura e o fluxo desejados são medidos pela pessoa que monitora as válvulas, fechando ou abrindo cada uma delas para chegar ao *set-point* desejado.
- São os *set-points*: Temperatura desejada e fluxo desejado (vazão).
- Temperatura e vazão de água da mistura.
- Temperatura e vazão de água da mistura.
- Vazão de água quente e vazão de água fria das válvulas do chuveiro.
- Diagrama:



1.7. RESUMO DA TRANSFORMADA DE LAPLACE

a. Notação

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$$

$$\frac{d}{dt}y(t) \equiv \dot{y}(t)$$

b. Derivada

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2}{dt^2}f(t)\right] = s^2\mathcal{L}[f(t)] - sf(0) - \dot{f}(0)$$

$$\mathcal{L}\left[\frac{d}{dt}f(t)\right] = s\mathcal{L}[f(t)] - f(0)$$

Em controle, a menos que se diga o contrário, as condições iniciais são nulas.

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2}{dt^2}f(t)\right] = s^2F(s)$$

$$\mathcal{L}\left[\frac{d}{dt}f(t)\right] = sF(s)$$

c. Integral

$$\mathcal{L}\left[\int f(t)dt\right] = \frac{\mathcal{L}[f(t)]}{s} - \frac{f^{-1}(0)}{s}$$

Com condições iniciais nulas.

$$\mathcal{L}\left[\int f(t)dt\right] = \frac{F(s)}{s}$$

$$\mathcal{L}\left[\iint f(t)dt\right] = \frac{F(s)}{s^2}$$

d. Funções Básicas

i. Impulso Unitário

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty; & t = 0 \\ 0; & t \neq 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{L}[\delta(t)] = \Delta(s) = 1$$

ii. Degrau Unitário

$$u(t) = \begin{cases} 1; & t \geq 0 \\ 0; & t < 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{L}[u(t)] = U(s) = \frac{1}{s}$$

iii. Rampa

$$r(t) = \begin{cases} t; & t \geq 0 \\ 0; & t < 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{L}[r(t)] = R(s) = \frac{1}{s^2}$$

iv. Polinômio

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}t^2; & t \geq 0 \\ 0; & t < 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{L}[p(t)] = P(s) = \frac{1}{s^3}$$

e. Teorema do Valor Inicial

$$f(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$$

f. Teorema do Valor Final

$$f(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$$

g. Transformada Inversa (Expansão em Frações Parciais)

i. Polos Simples

$$F(s) = \frac{K(s + z_1)(s + z_2) \cdots (s + z_m)}{(s + p_1)(s + p_2) \cdots (s + p_n)} \quad m < n$$

podemos escrever:

$$F(s) = \frac{a_1}{s + p_1} + \frac{a_2}{s + p_2} + \cdots + \frac{a_n}{s + p_n}$$

onde

$$a_k = [(s + p_k)F(s)]_{s=-p_k}$$

e

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{a_k}{s + p_k} \right] = a_k e^{-p_k t}$$

ii. Polos Múltiplos

$$F(s) = \frac{K(s + z_1)(s + z_2)}{(s + p_1)^3}$$

podemos escrever:

$$F(s) = \frac{a_1}{s + p_1} + \frac{a_2}{(s + p_1)^2} + \frac{a_3}{(s + p_1)^3}$$

onde

$$a_k = \frac{1}{(n - k)!} \left\{ \frac{d^{n-k}}{ds^{n-k}} [(s + p_1)^n F(s)]_{s=-p_1} \right\}$$

e

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{a_k}{(s + p_1)^k} \right] = \frac{a_k}{(k - 1)!} t^{k-1} e^{-p_1 t} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

1.8. RESUMO DA TRANSFORMADA Z

a. Notação

$$\mathcal{Z}[f[n]] = F(z)$$

b. Derivada

$$\mathcal{Z}\{\nabla_x^q[n]\} = (1 - z^{-1})^q X(z) - \sum_{p=0}^{q-1} (1 - z^{-1})^{q-p-1} \nabla^p x[-1]$$

c. Em controle, a menos que se diga o contrário, as condições iniciais são nulas.

$$\mathcal{Z}\{\nabla_x[n]\} = (1 - z^{-1})X(z)$$

d. Integral

$$\mathcal{Z}\left\{\sum_{k=-\infty}^n x[k]\right\} = (1 - z^{-1})^{-1} \left\{X(z) + \sum_{p=-\infty}^{-1} x[p]\right\}$$

Com condições iniciais nulas.

$$\mathcal{Z}\left\{\sum_{k=0}^n x[k]\right\} = \frac{X(z)}{1 - z^{-1}}$$

e. Funções Básicas

i. Impulso Unitário

$$\delta[n] = \begin{cases} 1; & n = 0 \\ 0; & n \neq 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{Z}[\delta[n]] = \Delta[z] = 1$$

ii. Degrau Unitário

$$u[n] = \begin{cases} 1; & n \geq 0 \\ 0; & n < 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{Z}[u[n]] = U(z) = \frac{z}{z - 1}$$

iii. Rampa

$$r[n] = \begin{cases} n; & n \geq 0 \\ 0; & n < 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{Z}[r[n]] = R(z) = \frac{T_s z}{(z - 1)^2}$$

iv. Polinômio

$$p[n] = \begin{cases} \frac{1}{2}n^2; & n \geq 0 \\ 0; & n < 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{Z}[p[n]] = P(z) = T_s^2 z \frac{z + 1}{(z - 1)^3}$$

f. Teorema do Valor Inicial

$$f[0^+] = \lim_{z \rightarrow \infty} F(z)$$

g. Teorema do Valor Final

$$f[\infty] = \lim_{z \rightarrow 1} (z - 1)F(z)$$

1.9. MATLAB

Exemplo de funções do Matlab uteis para o capítulo.

```
% Exemplo
num = [1, 2];
den = [9, 8, 7];

%% Função de Transferência
sys1 = tf(num, den);
% ou
s = tf('s');
G = (s + 1)/(s^2 + 2*s + 1);

%% Resíduo da Expansão em Frações Parciais
[r,p,k] = residue(num, den);

%% Realimentação Unitária Negativa
sys2 = feedback(G,1);
```

1.10. PYTHON

Para as simulações será utilizada a *Python Control Systems Toolbox*, cujo manual pode ser encontrado aqui: <https://python-control.readthedocs.io/en/0.9.0/intro.html>

O pacote *python-control* pode ser instalado usando *pip*, *conda* ou os mecanismos *distutils* / *setuptools* padrão. O pacote requer *numpy* e *scipy*, e as rotinas de plotagem requerem *matplotlib*. Além disso, algumas rotinas requerem a biblioteca *slycot* para implementar recursos mais avançados (incluindo algumas funcionalidades MIMO).

Para usuários com a distribuição Anaconda do Python, os seguintes comandos podem ser usados:

```
conda install numpy scipy matplotlib    # if not yet installed
conda install -c conda-forge control
```

Existem duas maneiras diferentes de usar o pacote. Para a interface padrão descrita em Referência de função, basta importar o pacote de controle da seguinte forma:

```
>>> import control
```

Se você deseja ter um ambiente semelhante ao Matlab, use o módulo de compatibilidade do Matlab:

```
>>> from control.matlab import *
```

onde * é o nome de cada função separada por vírgula.

Exemplo de Python no Spyder

```
1 from scipy.signal import residue    # função resíduo
2 from control.matlab import tf, feedback    # MATLAB-like functions
3
4 num = [1., 2.]
5 den = [9., 8., 7.]
6
7 # função de Transferência
8 sys1 = tf(num, den)
9 # ou
10 s = tf('s')
11 G = (s + 1)/(s**2 + 2*s + 1)
12
13 # Resíduo da Expansão em Frações Parciais
14 [r,p,k] = residue(num, den, 0.001, 'avg')
15
16 # Realimentação Unitária
17 sys2 = feedback(G,1,-1)
18 |
```

1.11. LISTA DE EXERCÍCIOS

1. Elabore um esquema de controle da direção de um automóvel realizado por um motorista.
2. Elabore um sistema de controle de malha aberta para uma mesa rotativa acoplada a um motor CC.
3. Efetue o controle de malha fechada (MF) do problema anterior e para isso utilize um tacômetro. (Um tacômetro é um dispositivo que converte velocidade angular em tensão elétrica).
4. Elabore um sistema de controle para um termo gerador. Um termo gerador é constituído de um gerador acoplado a uma turbina que gira pela pressão de vapor produzida por uma caldeira. O aquecimento da caldeira demanda o uso de combustível e de ar. As variáveis do processo são: nível, pressão, temperatura e geração observada. As variáveis são monitoradas por um computador.

Livro DORF 8 Ed: E1.1, E1.2, E1.4 a E1.7, P1.1, P1.3, P1.4, P1.5, P1.7, P1.10, P1.11, P1.13, P1.15, P1.16, P1.18, P1.19 e P1.23.