

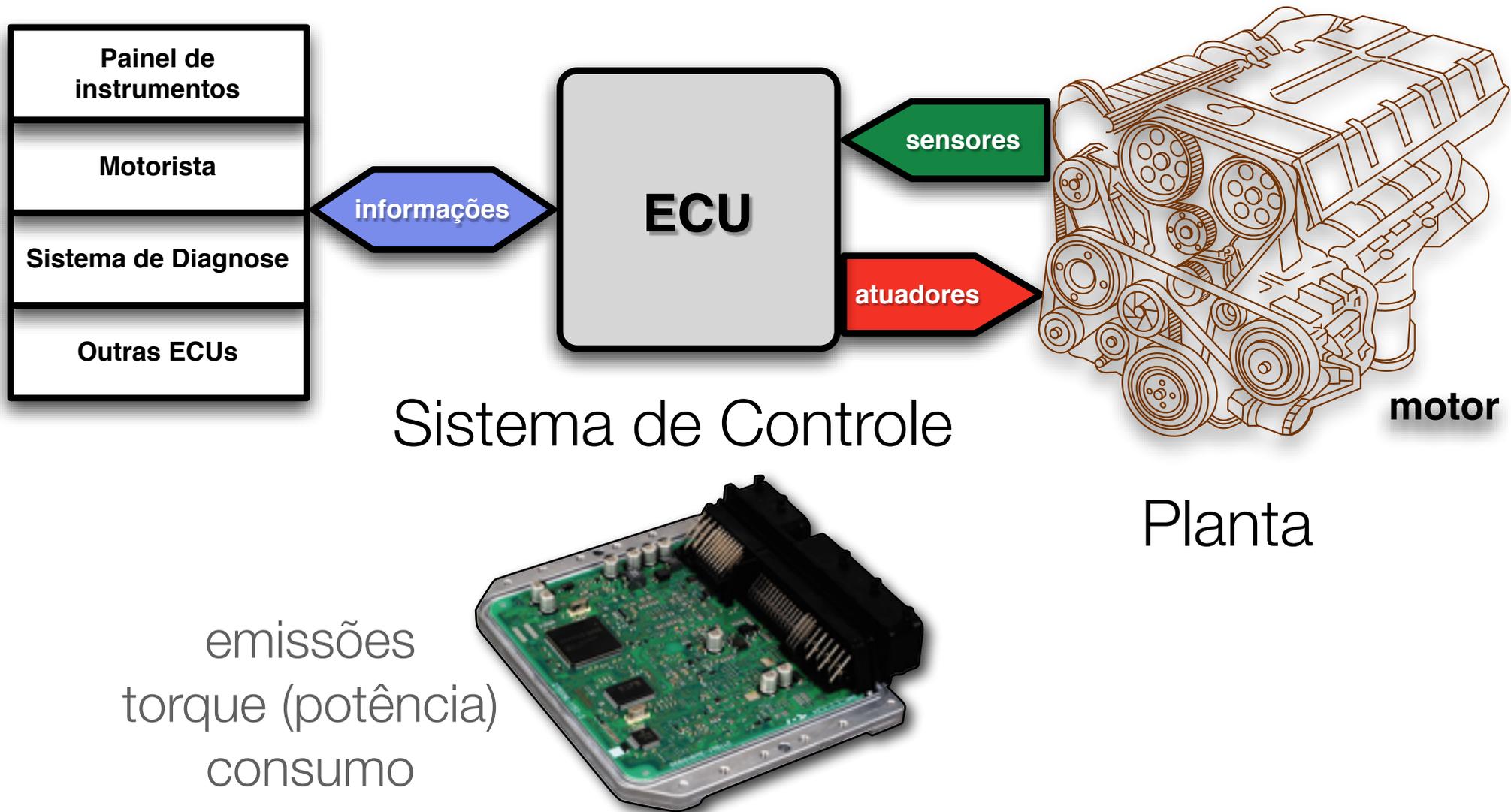


Escola de Engenharia de São Carlos
SMM0166 - Eletrônica Aplicada aos Motores CI

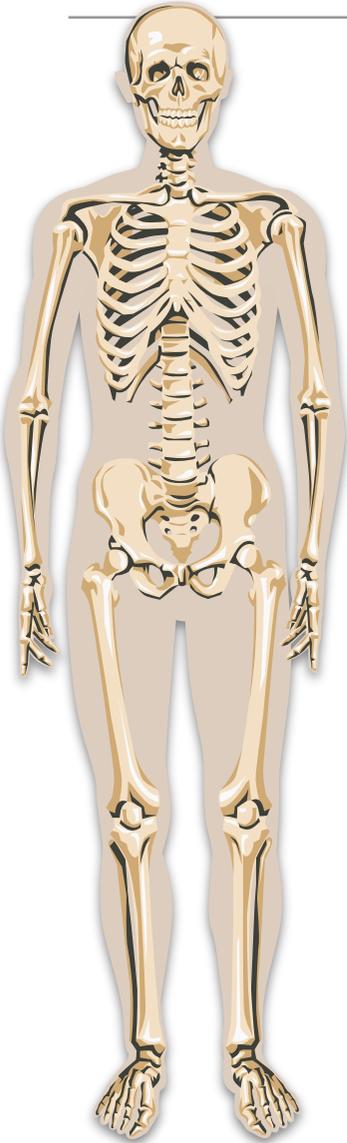
Conceitos Fundamentais de Modelagem, Instrumentação e Sistemas de Controle



Síntese do Capítulo



1. O que é *sistema*



- Um sistema é uma coleção de peças ou componentes interativos que funcionam juntos para desempenhar uma tarefa específica.

Exemplo: ossos _ esqueleto
(peças) (sistema)

- *Cada sistema é uma coleção de peças interativas.* Os sistemas eletrônicos são montagens de componentes eletrônicos, interligados de maneira a executar uma tarefa específica.



- Em geral, cada peça ou componente possui uma entrada e uma saída e a relação entre essas duas é determinada pela configuração interna.
- Na ciência de sistemas, cada componente é representado por uma relação funcional entre a resposta (*saída*) e a excitação (*entrada*) e não pelos detalhes do seu funcionamento interno.
- Para **montar** um sistema, só é necessário conhecer e entender (ainda que muito grosseiramente) os requisitos de entrada e saída dos componentes do sistema.

- *Dinâmica* refere-se a uma situação ou estado que é dependente do tempo.
- O estudo de um sistema dinâmico pode ser entendido como sendo o estudo de seu comportamento, em função do tempo, observando as variáveis de interesse.



- Entradas são grandezas que estimulam, que excitam um sistema.
- Saídas são as *reações*, respostas, do sistema a um ou mais estímulos externos.
- Perturbações (ou distúrbios) são sinais que tendem a afetar adversamente o valor da saída do sistema. Se a perturbação for gerada dentro do sistema, ela é denominada *perturbação interna*, enquanto que um *distúrbio ou perturbação externa* é gerado fora do sistema e constitui uma *entrada*.

2. Projeto de Sistema

- O projetista de um sistema eletrônico normalmente começa desenhando um diagrama de blocos descrevendo cada componente funcional e o fluxo de sinais através do sistema, suas relações funcionais entre entrada e saída para cada componente.
- O diagrama de blocos fornece as bases para o raciocínio sobre a operação do sistema e se o sistema funcionará ou não como o planejado.

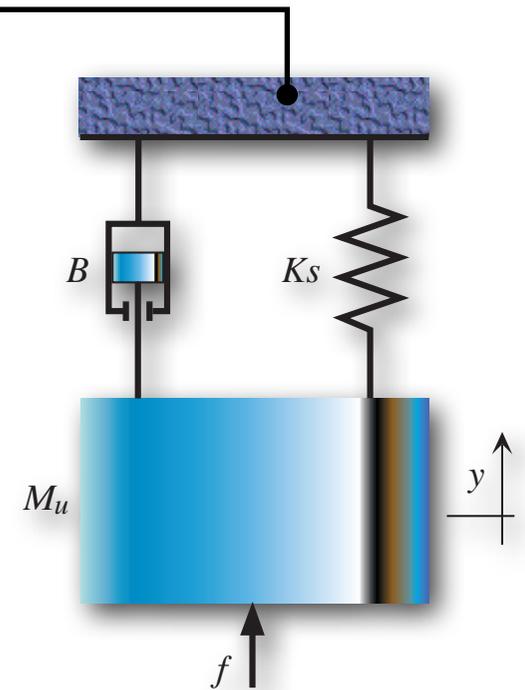
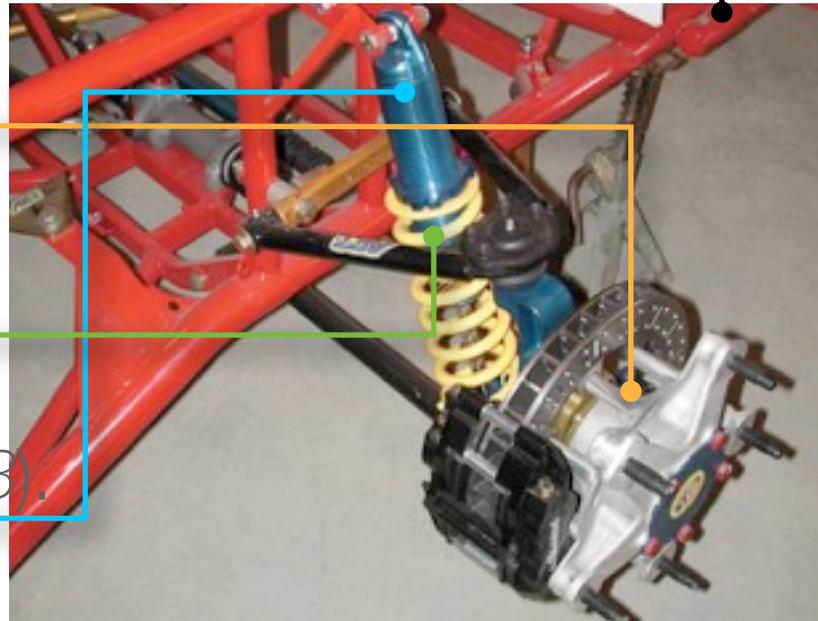
• exemplo

Modelagem de uma suspensão a partir de seus três componentes fundamentais:

i. massa (M_u);

ii. mola (K_s);

iii. amortecedores (B).



• Modelagem matemática

Aplicando a 2ª Lei de Newton à massa M_u :

$$f - K_s \cdot y - B \cdot \dot{y} = M_u \cdot \ddot{y}$$

Domínio do
tempo

Aplicando a Transformada de Laplace (Cls nulas), temos:

$$\frac{Y}{F}(s) = \frac{1}{M_u \cdot s^2 + B \cdot s + K_s}$$

Domínio da
freqüência

M_u = massa não
suspensa;

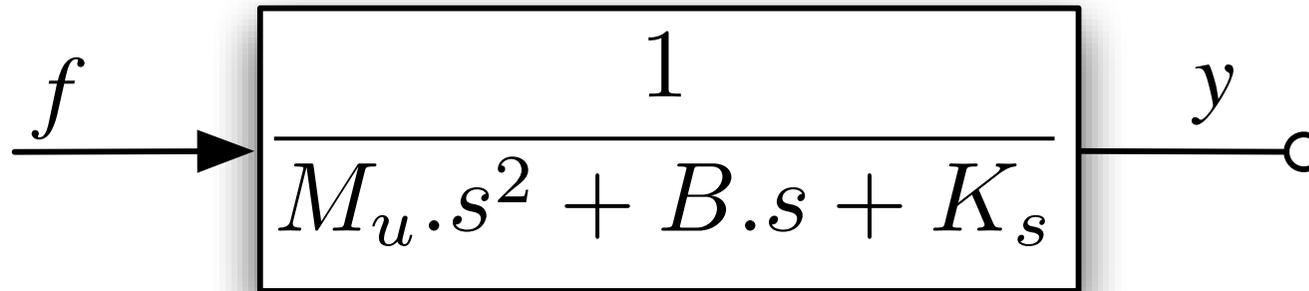
K_s = constante da
mola;

y = deslocamento
da roda.

B = constante do
amortecedor;

f = força de
contato com o
solo;

- Em diagrama de blocos, temos:



- A relação funcional entre a saída e a entrada do sistema é, portanto:

$$\frac{Y}{F}(s) = \frac{1}{M_u \cdot s^2 + B \cdot s + K_s}$$

Função de
Transferência

$$\frac{Y}{F}(s) = \frac{1}{M_u \cdot s^2 + B \cdot s + K_s} \equiv \frac{1 / K_s}{\frac{M_u}{K_s} s^2 + \frac{B}{K_s} s + 1} \equiv \frac{K}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + 2 \frac{\zeta}{\omega_n} s + 1} \equiv G(s)$$

• Definindo:

$G(s) \triangleq \frac{Y}{F}(s)$ = função de transferência do sistema;

$K \triangleq \frac{1}{K_s}$ = sensibilidade ou ganho do sistema - [m/N];

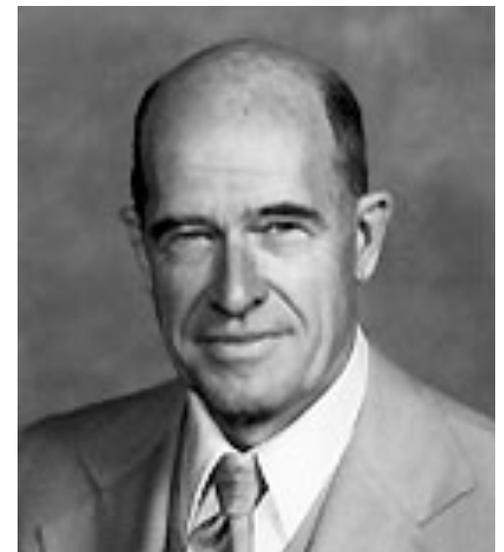
$\omega_n \triangleq \sqrt{\frac{K_s}{M_u}}$ = frequência angular natural - [rd/s];

$\zeta \triangleq \frac{1}{2} \frac{B}{\sqrt{M_u \cdot K_s}}$ = fator de amortecimento do sistema - [-];



- Mathworks **MatLab** (*Matrix Laboratory*)
- é um pacote que integra análise numérica, cálculo de matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos.
- O código é construído na linguagem Matlab, às vezes chamada M-código ou simplesmente M.

- O Método do Lugar das Raízes
- mostra, graficamente, todas as possíveis soluções que uma equação característica pode ter quando um dos parâmetros de projeto é variável.
- foi criado por W. R Evans, um dos engenheiros da Bell Laboratories, no final dos anos 1940.



Walter R. Evans (1920 - 1999)

- A fim de tornar o exemplo mais didático, vamos parametrizar a FT e deixá-la sob a forma:

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta s + 1}$$

- E vamos estudar a influência do fator de amortecimento ζ da suspensão sobre a dinâmica do sistema.
- Tomamos a **equação característica**:

$$s^2 + 2\zeta s + 1 = 0$$

$$s^2 + 1 + \zeta \cdot 2s = 0$$

- Na forma de Evans, a equação característica fica:

$$1 + \zeta \frac{2s}{s^2 + 1} = 0$$

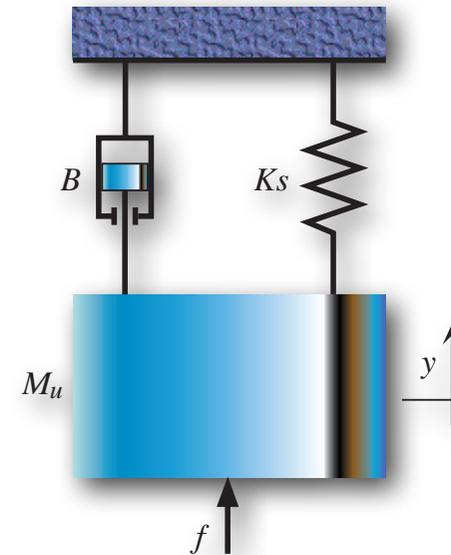
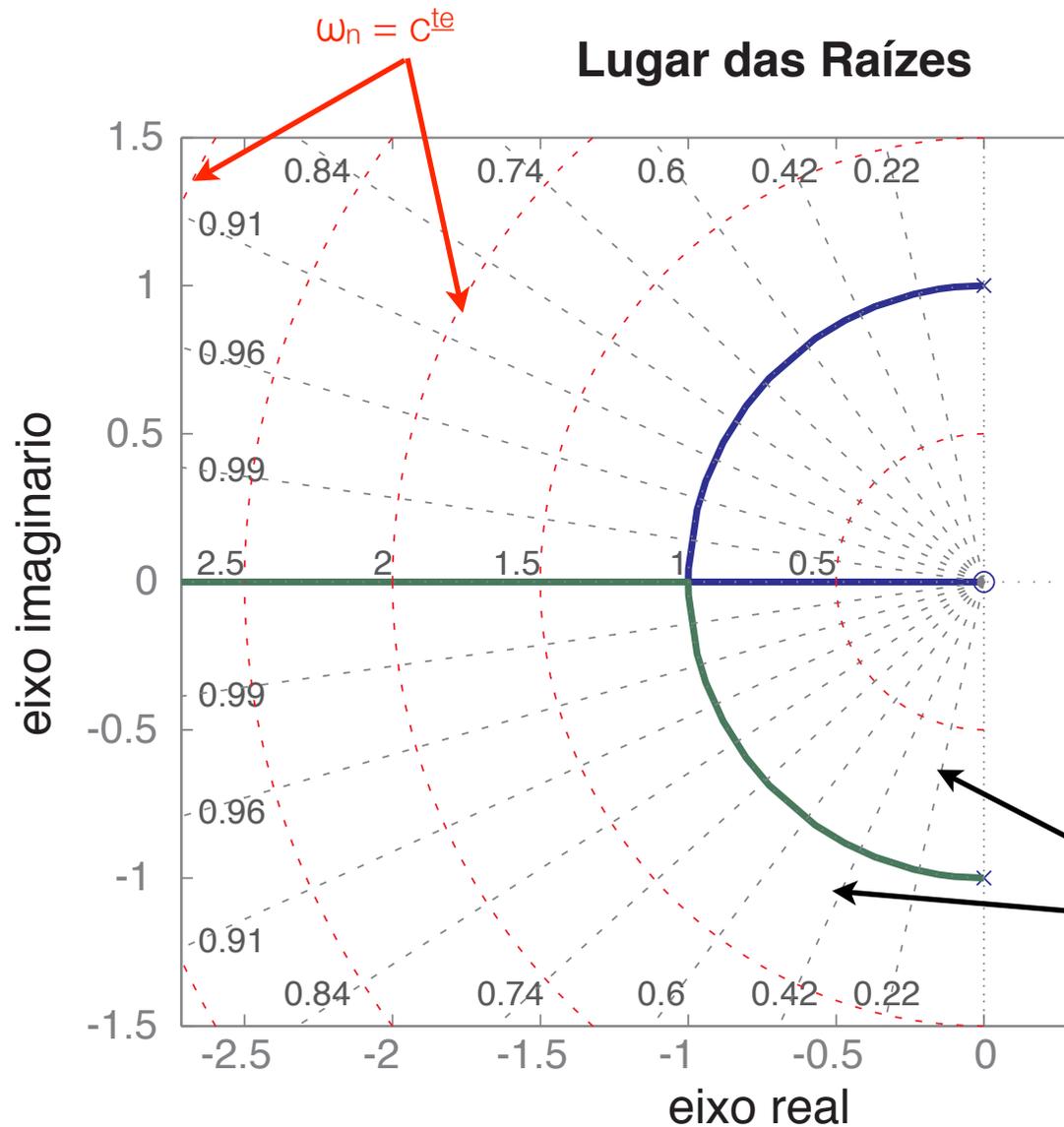
$$1 + k \cdot G_1 H_1 (s) = 0$$

- Por comparação:

$$k \triangleq \zeta$$

$$G_1 H_1 (s) \triangleq \frac{2s}{s^2 + 1}$$

- Gráfico do lugar (passeio) das raízes



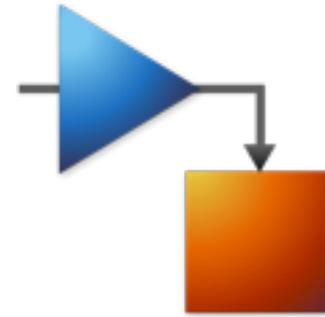
frequência natural ω_n :

$$\omega_n \triangleq \sqrt{\frac{K_s}{M_u}}$$

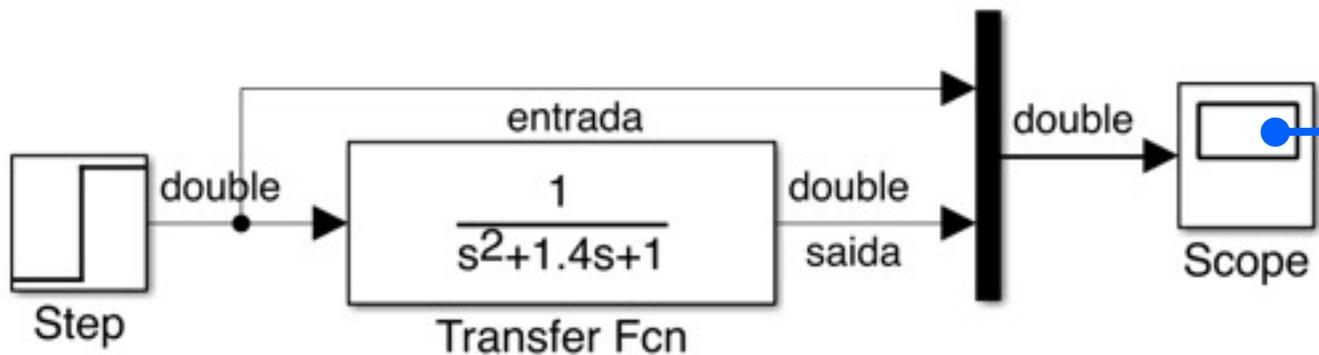
fator de amortecimento ζ :

$$\zeta \triangleq \frac{B}{2\sqrt{K_s \cdot M_u}}$$

- **Simulink**



- Simulink, desenvolvido pela companhia MathWorks, é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos.
- Sua interface primária é uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis de blocos.
- O software oferece alta integração com o resto do ambiente MATLAB.



Análise de desempenho

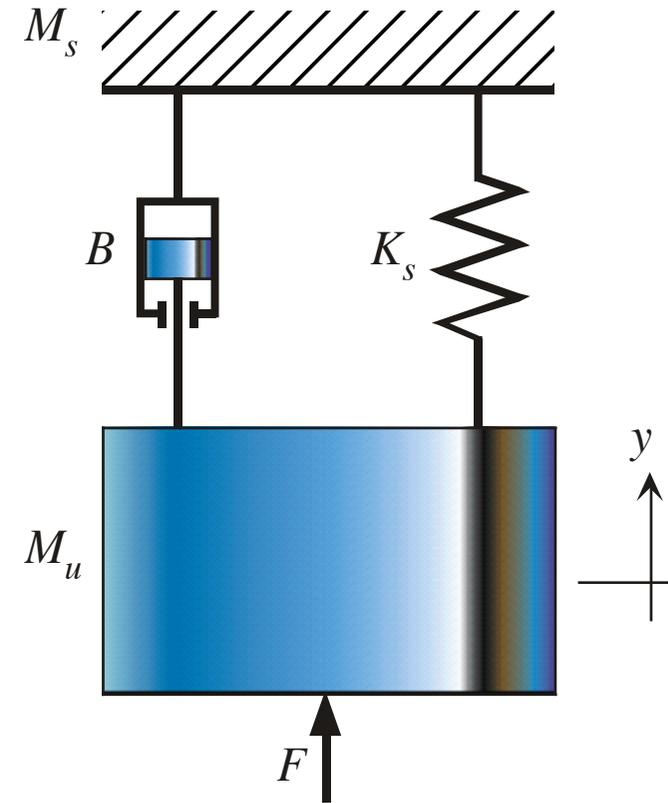
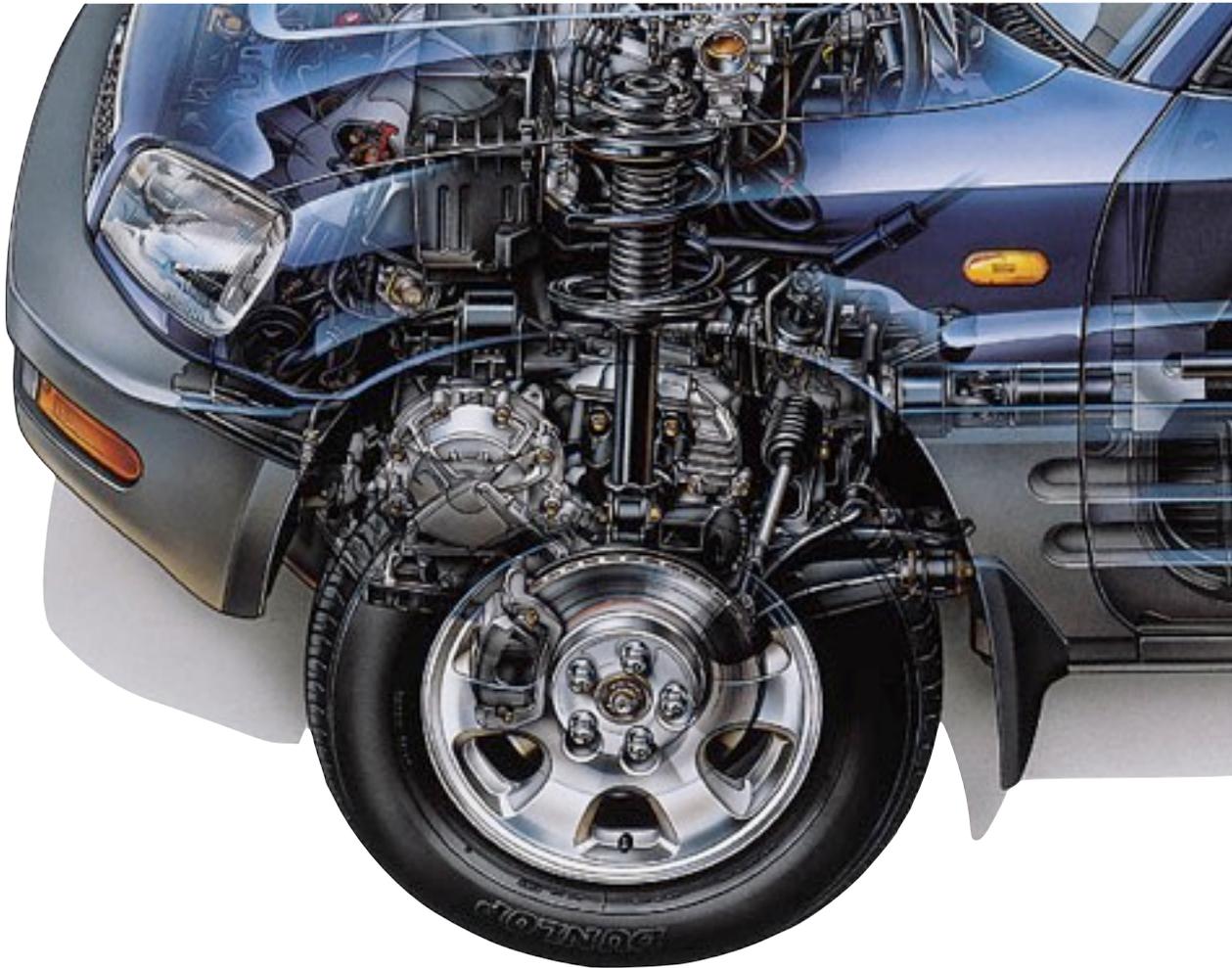
- A análise de desempenho expressa quantitativamente quão bem o sistema desempenha ou desempenhará sua tarefa proposta.
- A maioria dos projetistas calculam o desempenho do sistema a partir dos diagramas de blocos e das relações funcionais de cada componente.
- Essa mesma análise de desempenho pode ser usada para refinar a configuração do sistema para alcançar um desempenho melhor.

3. Desempenho do Sistema

- **3.1. Resposta em Frequência**

- O desempenho de qualquer sistema pode ser avaliado a partir de sua resposta em frequência (RF). Propriedades importantes podem ser determinadas a partir dessa resposta como ressonâncias, largura de banda (BW) e resposta a mudanças bruscas.

- Exemplo: considere o mais simples modelo de 1/4 da suspensão de um automóvel de passeio.



modelo

$$\frac{Y}{F}(s) = \frac{1}{M_u \cdot s^2 + B \cdot s + K_s}$$

- A RF de qualquer sistema é uma função da frequência excitadora, que nesse caso, é proporcional à velocidade do carro sobre a pista.

$$f = F. \sin (\omega . t)$$

em que:

F = amplitude da força excitadora;

ω = frequência angular;

t = tempo;

T = período do seno;

$$y = Y. \sin (\omega . t - \phi) \quad \phi = 2. \pi . \frac{d}{T}$$

em que:

Y = amplitude do deslocamento da roda;

Φ = defasagem ou ângulo de fase;

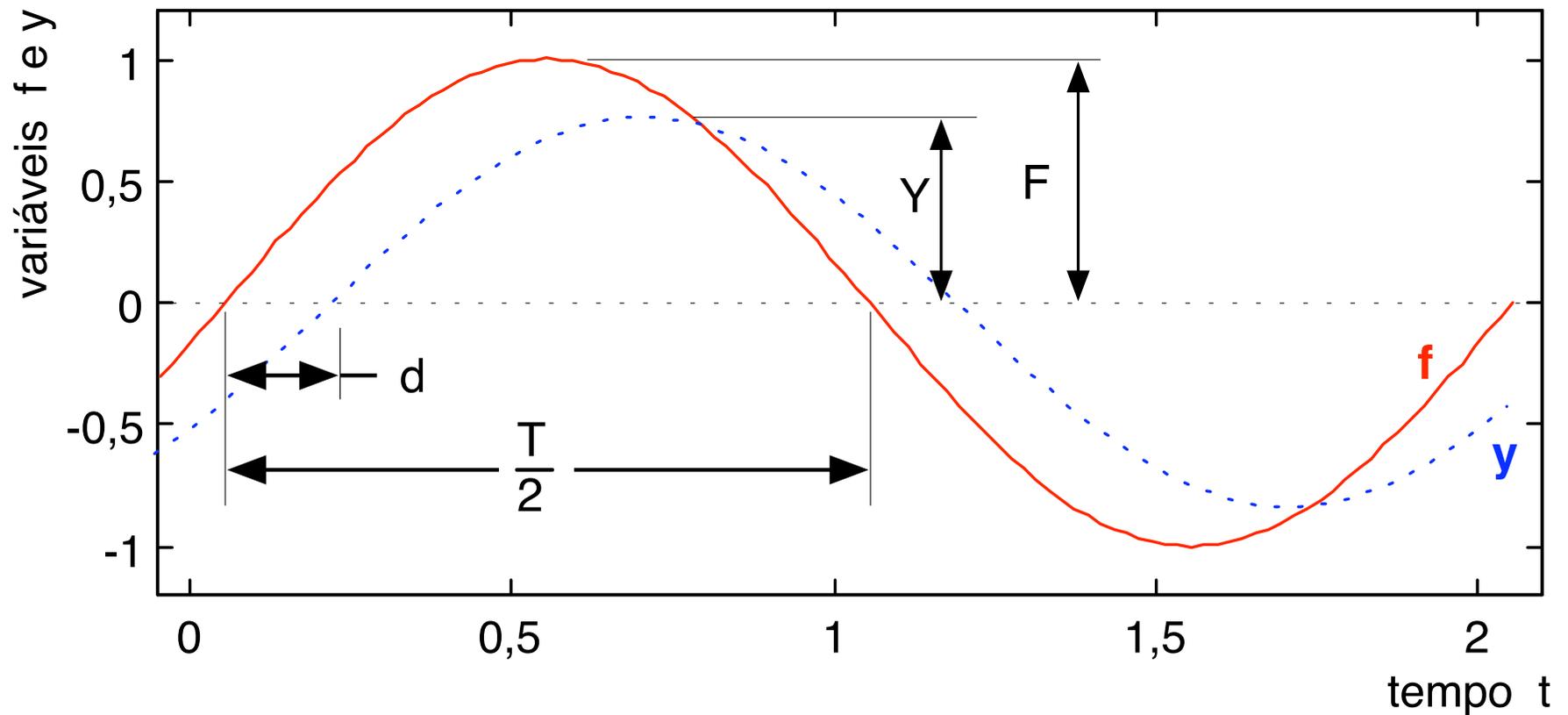
d = atraso ou defasagem no tempo;

- graficamente:

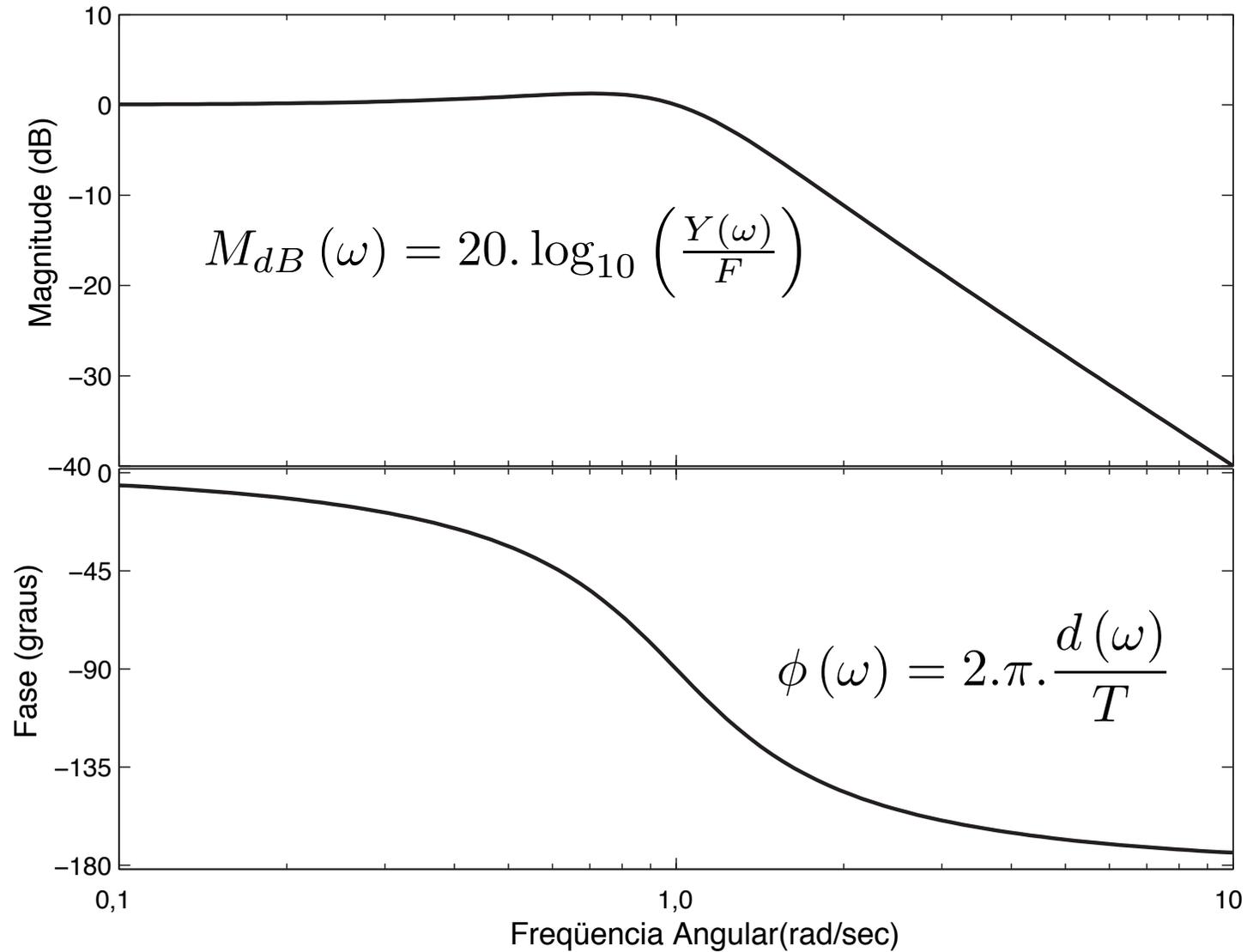
$$f = F \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$y = Y \cdot \sin(\omega \cdot t - \phi)$$

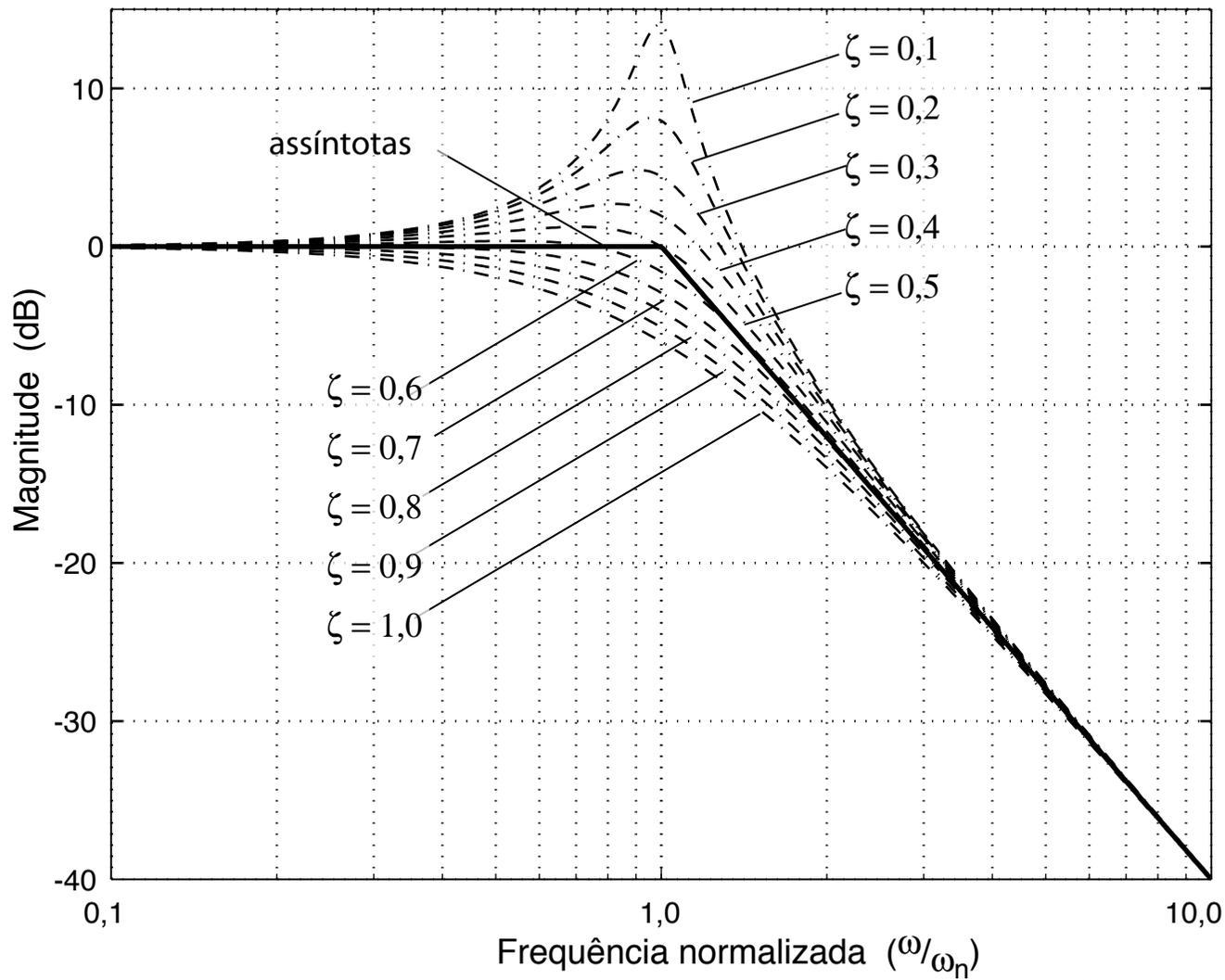
$$\phi = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{T}$$



- Diagramas de Bode

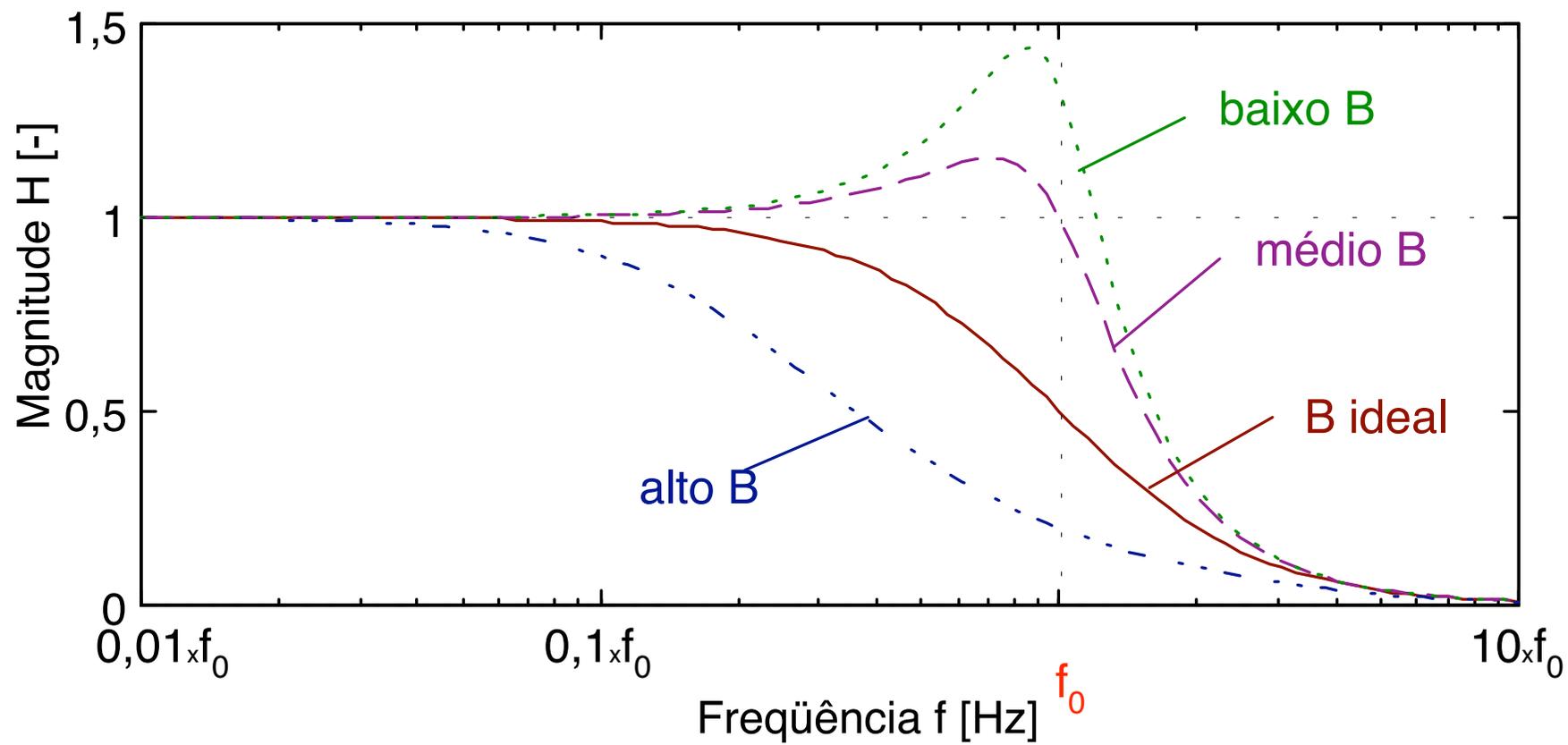


$$M_{dB}(\omega) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{Y(\omega)}{F} \right)$$



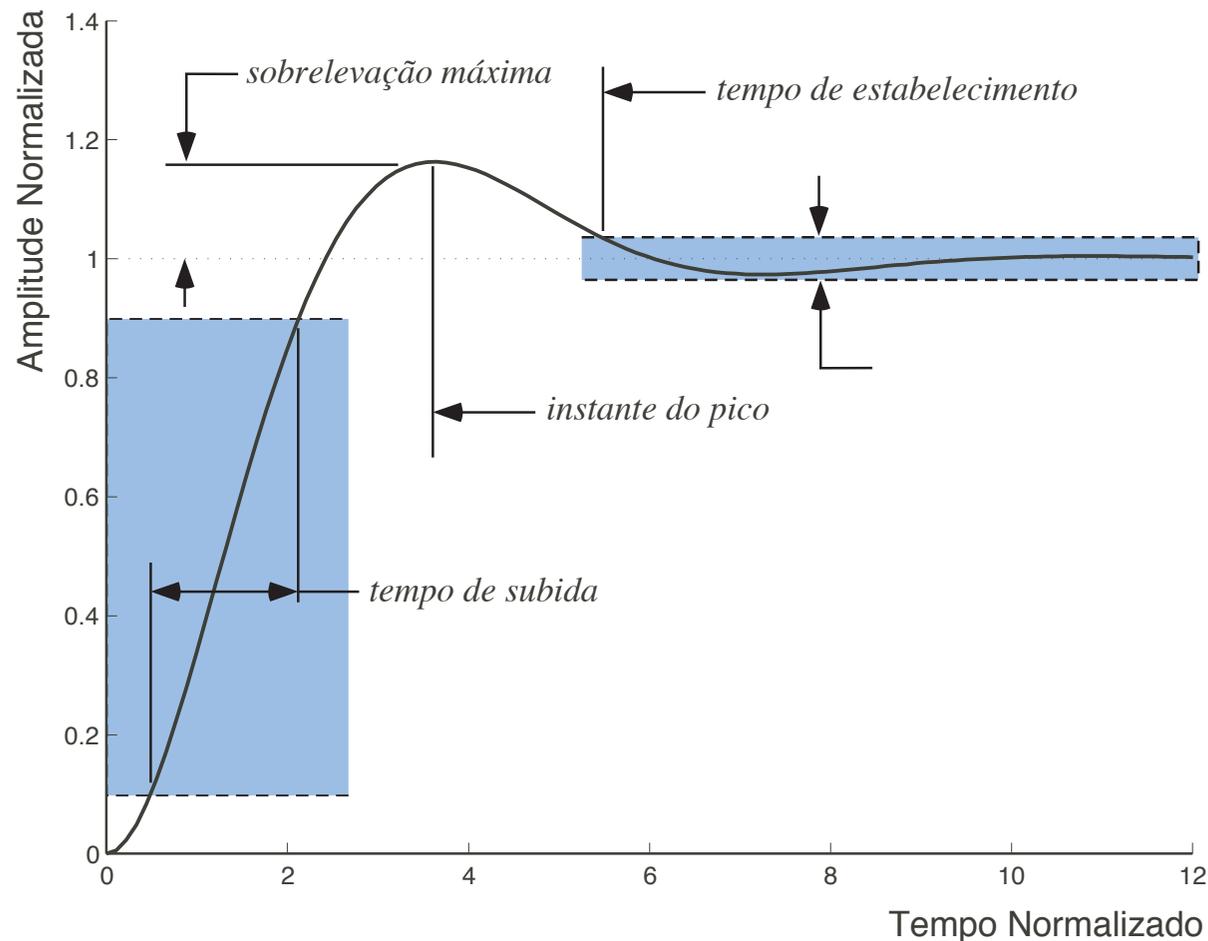
$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{M_u}}$$

- Conclusões



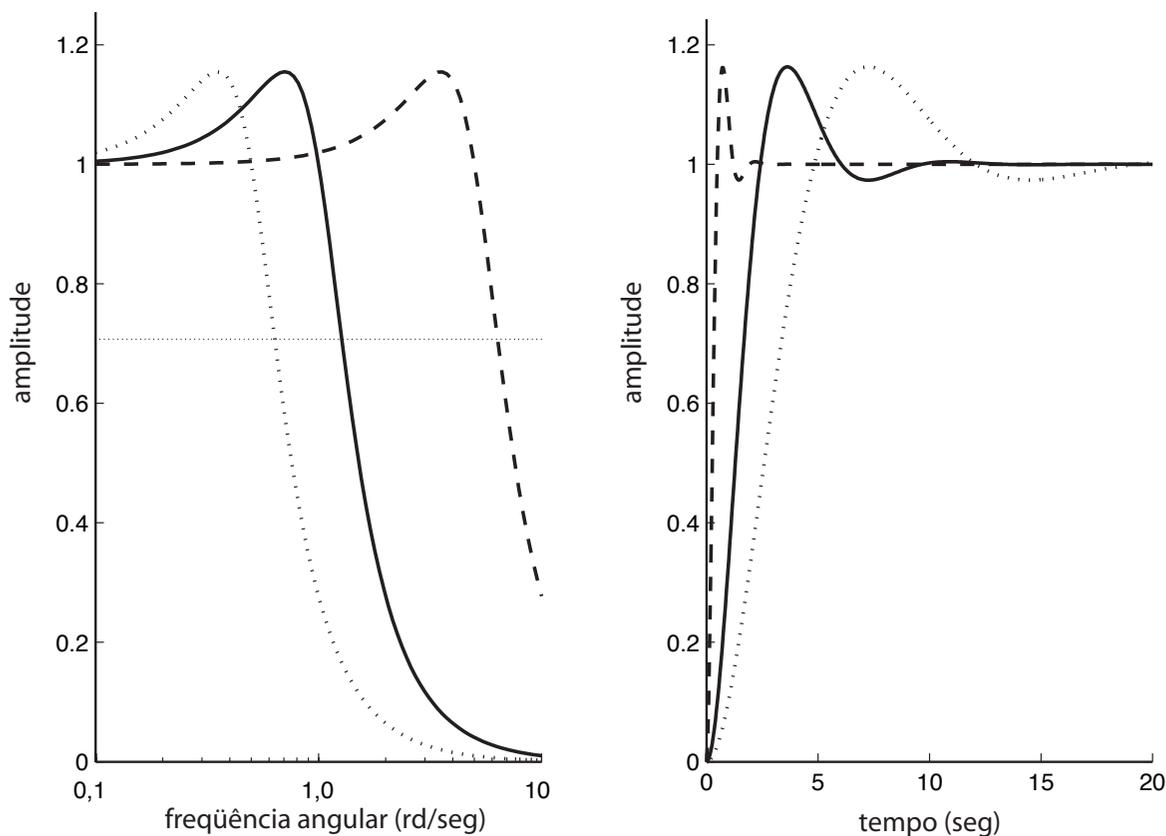
• 3.2. Entrada Degrau

- O desempenho de um sistema também pode ser representado no *tempo*. O método mais conveniente é o da *resposta a entrada degrau*.

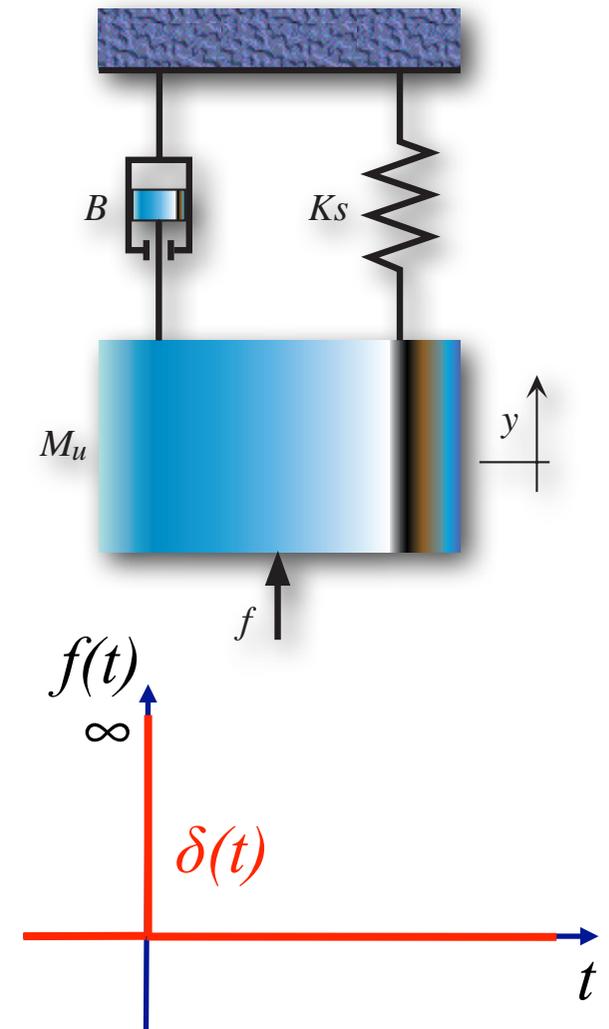
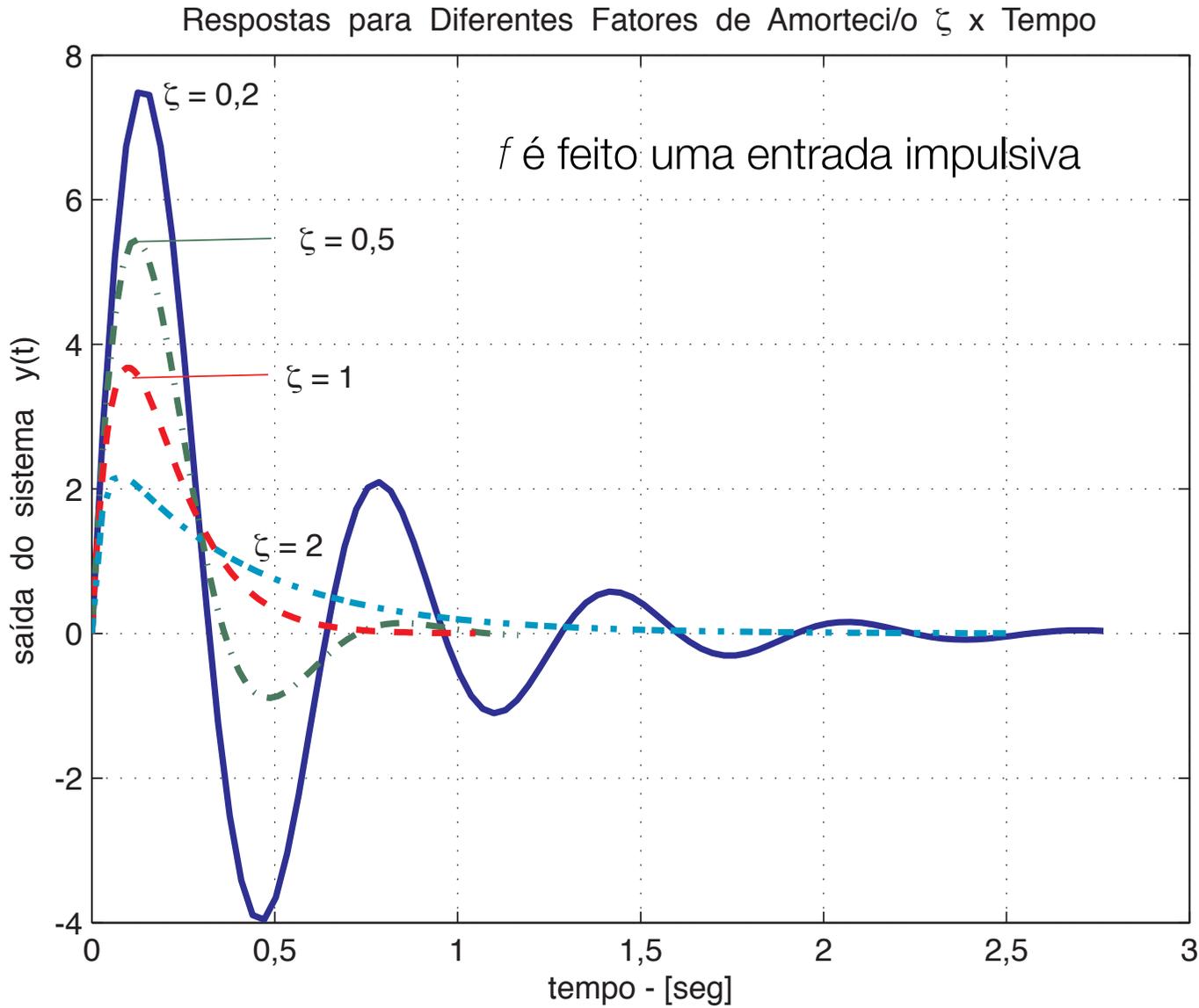


• 3.3. Relação entre DF e Resposta ao Degrau

- A razão na qual a resposta se aproxima do valor final varia inversamente com a BW. Ou seja, geralmente, o tempo de resposta de qualquer sistema varia inversamente com sua BW.



- avaliação do desempenho



4. Instrumentação

- *“É o conjunto de dispositivos e técnicas utilizadas para aquisição, processamento, indicação, registro e controle de variáveis que definem o comportamento de um sistema físico.”*



- **Medir** significa traduzir em números a realidade, de preferência, sem interferir no sistema real;

- Esses instrumentos automotivos são usados para medir uma variedade de grandezas físicas, incluindo:
 - velocidade do veículo (velocímetro);
 - a distância total percorrida (odômetro);
 - rotação do motor (tacômetro);
 - quantidade combustível no tanque e/ou consumo de combustível;
 - pressão do óleo lubrificante;
 - temperatura do radiador de calor;
 - carga do alternador (dínamo);

6. Medidas

- Uma **medida** é uma comparação numérica entre uma magnitude desconhecida de uma dada quantidade física e uma magnitude padrão dessa mesma quantidade física.
- Assim falando, o resultado de uma medida é geralmente um valor numérico que expressa o valor indicado de uma medida como um múltiplo de um padrão apropriado.

- Entretanto, são possíveis dispositivos mostradores, através dos quais apenas simples mensagens são dadas. A instrumentação automotiva não consiste apenas de medidores, mas também de mostradores ou indicadores.



- **6.1. Indicadores**

- São dispositivos capazes de apresentar ao usuário o valor medido da grandeza (variável) de interesse. Os principais indicadores utilizam **ponteiros** como os galvanômetros e manômetros.



- Numa medida, realizada por qualquer instrumento, existem importantes características que são avaliadas:
 - padrão;
 - precisão;
 - acuracidade (exatidão);
 - resolução;
 - erros;
 - calibração;
 - confiabilidade.
- Cada uma delas tem um importante impacto sobre o desempenho da instrumentação.

- **6.2. Padrões**

- Os padrões são mantidos pelo INPM (Instituto Nacional de Pesos e Medidas);



- **6.3. Precisão**

- É a medida da **repetibilidade**, i.e., o grau de concordância entre as medições individuais de um conjunto de medições, todas de uma mesma quantidade.
- A precisão também relaciona o número de algarismos significativos que podem ser lidos num mostrador;



- **6.4. Acuracidade**

- A **acurácia** é uma medida da fiabilidade.
- É a conformidade do valor indicado, derivado de uma série de medições, para o valor verdadeiro da quantidade medida.
- Na realidade, **o valor verdadeiro nunca é conhecido.**



- **6.4. Resolução**

- É o menor intervalo mensurável pelo instrumento.



- **6.5. Erros**

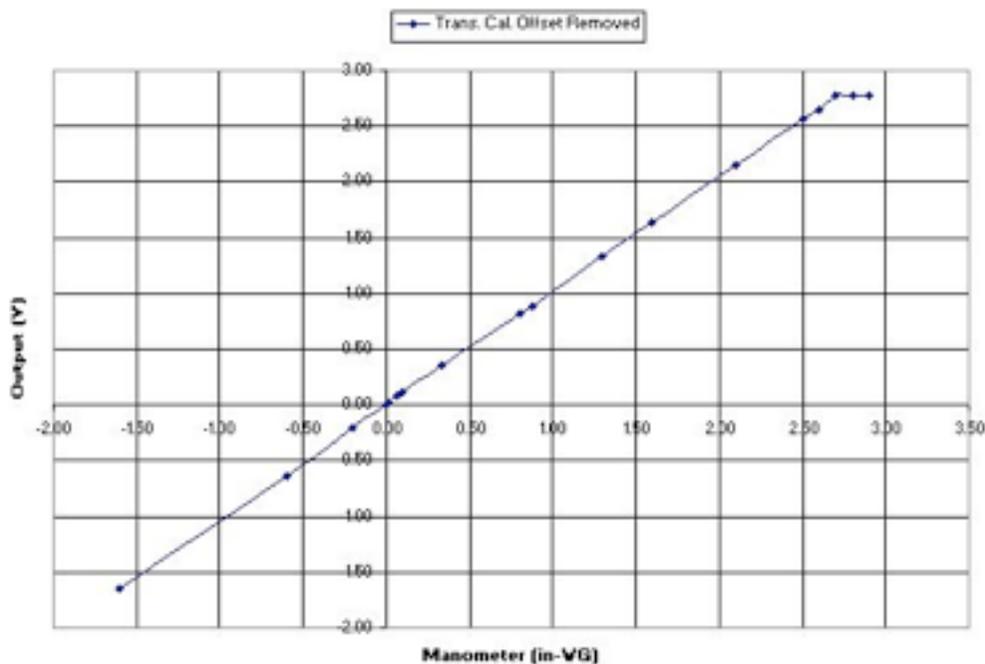
- Erro é a diferença entre os valores real e indicado
- a) *erros sistemáticos*: resultam de variações conhecidas no desempenho do instrumento. Correções podem ser feitas para minimizar o efeito. Ex: influência da temperatura.
- b) *erros aleatórios*: são essencialmente flutuações aleatórias no valor indicado de uma medida. A maioria desses erros é resultado de uma ou outra forma de ruído.

- c) *erros por efeito carga*: são resultado da retirada de energia do meio de medida. Essa energia retirada causa uma mudança na quantidade sendo medida.
- d) *resposta dinâmica* de um instrumento é outra fonte de erro sistemático. Uma maior *BW* garante maior capacidade do instrumento de seguir mudanças bruscas, porém o deixa mais susceptível a ruídos.

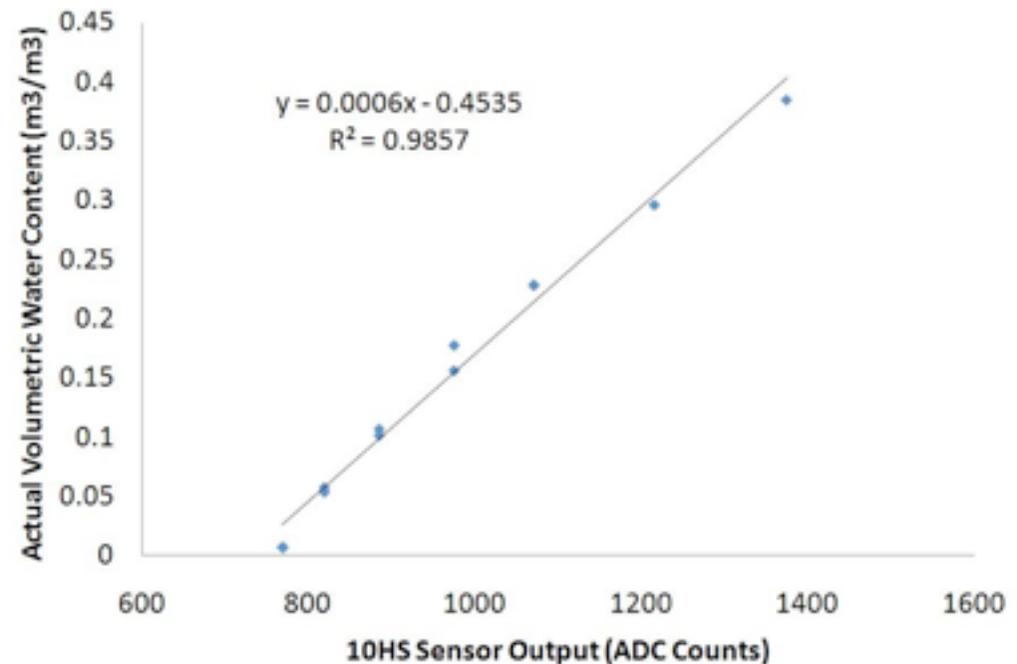
• 6.6. Calibração

- A calibração é o ato de ajustar os parâmetros de um instrumento de forma que o valor indicado coincida com o valor verdadeiro da qualidade mensurada.

Pressure Sensor Calibration - 2.26V Offset Removed



10HS Calibration for Palouse Silt Loam



- **6.7. Confiabilidade**

- A confiabilidade refere-se à habilidade do instrumento de medida de executar sua função acurada e continuamente, sempre que for preciso, sob condições desfavoráveis e durante uma quantidade razoável de tempo.

7. Sistema de Medida Básico

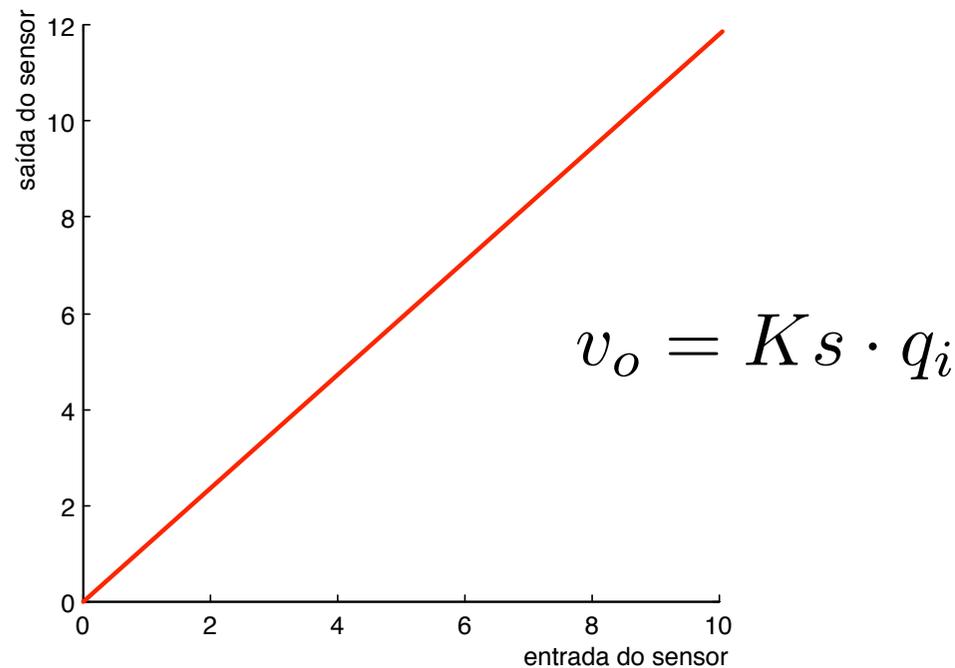


1. *sensor*: converte uma quantidade física, q_i num sinal elétrico, q_1 ;
2. *processador de sinal*; realiza alguma operação no sinal do sensor, q_1 para aumentar seu nível de potência; confiabilidade e acuracidade e coloca-lo numa forma que quando mostrado, possa ser compreendido por humanos.
3. *dispositivo mostrador*: converte o sinal, q_2 do processador numa quantidade legível, q_o .

- **7.1. Sensor**

sensor ideal:

em que:



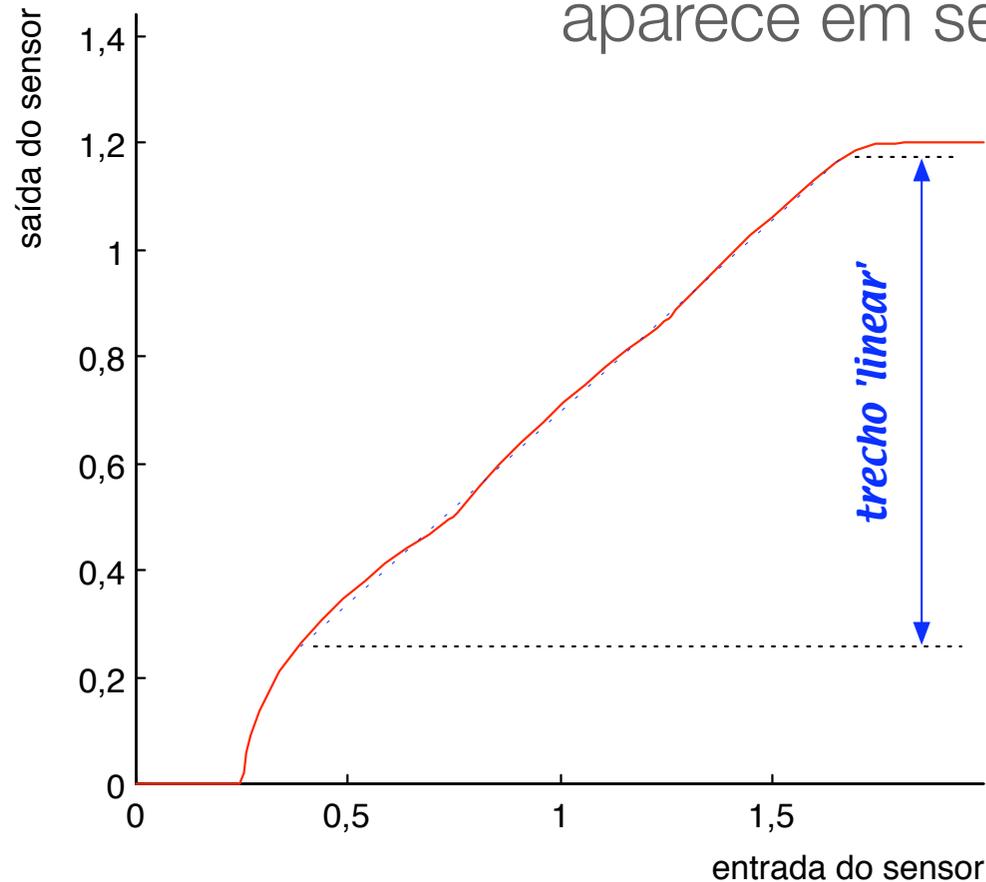
K_s = constante de calibração do sensor

Um sensor ideal responde **apenas** a uma grandeza física.

Um sensor é susceptível a erros tanto como qualquer outro sistema ou componente do sistema. **Fontes potenciais de erro** incluem: efeito de carga, resposta dinâmica finita, mudanças na calibração e comportamento não-linear.

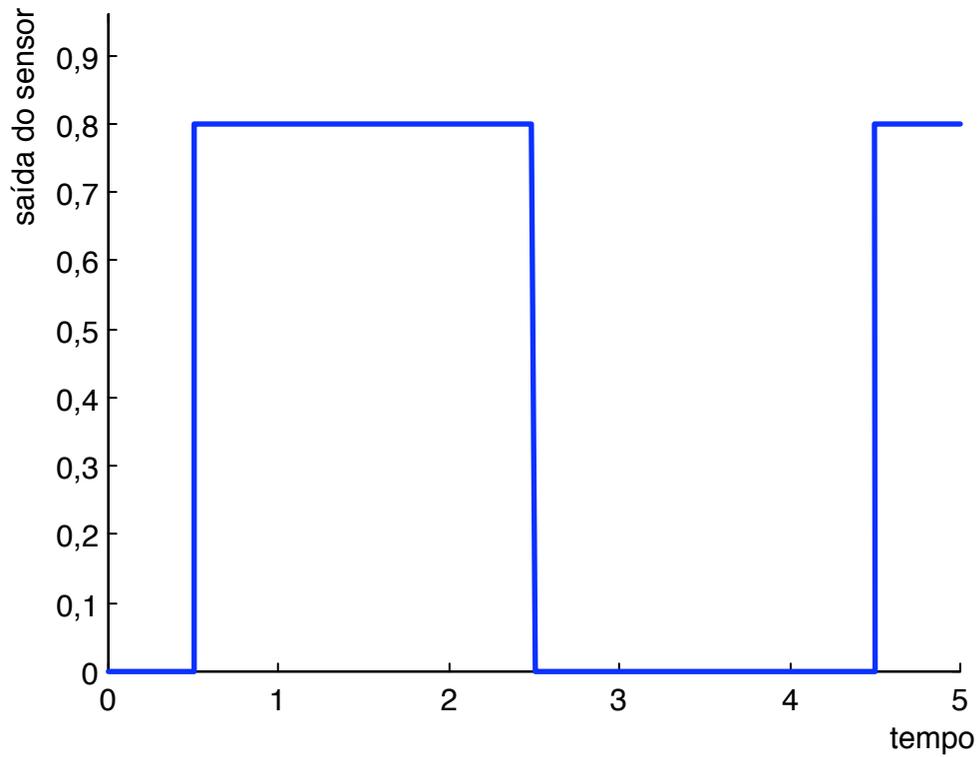
- **sensor real**

Os **erros aleatórios** nos sensores eletrônicos são causados principalmente por algum tipo de ruído elétrico interno como ruído térmico e/ou ruído *shot* (um ruído que aparece em semicondutores).

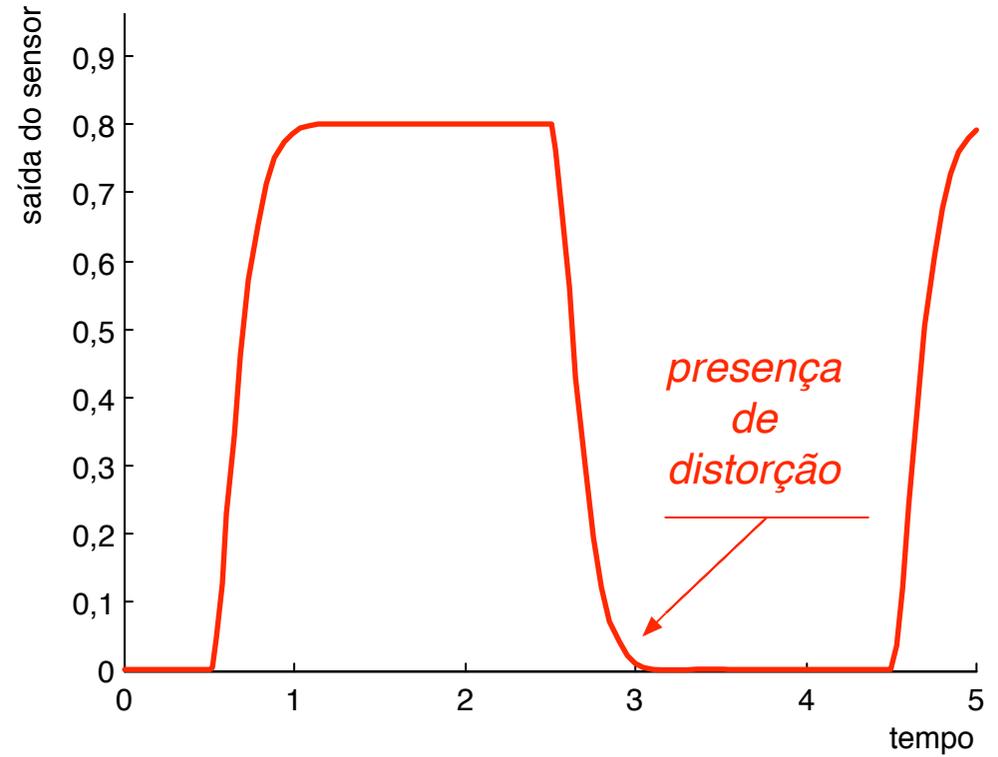


- diferença entre o sensor real e o ideal

Entrada do Sensor



Saída do Sensor



- **7.2. Atuadores e mostradores**

- ***Atuador***: é um dispositivo conversor de energia (*transdutor*) que tem como entrada elétrica e como saída uma variável mecânica. (ex: força, deslocamento, velocidade, etc.).
- ***Mostrador***: é a maneira de um sistema de medidas tornar disponível para o usuário o resultado de sua medida. Exemplos: velocímetros, tacômetros etc.

- Os **mostradores**, assim como os atuadores são dispositivos conversores de energia, possuem BW , faixa dinâmica e características de calibração como os sensores e portanto, estão sujeitos aos mesmos tipos de erros.

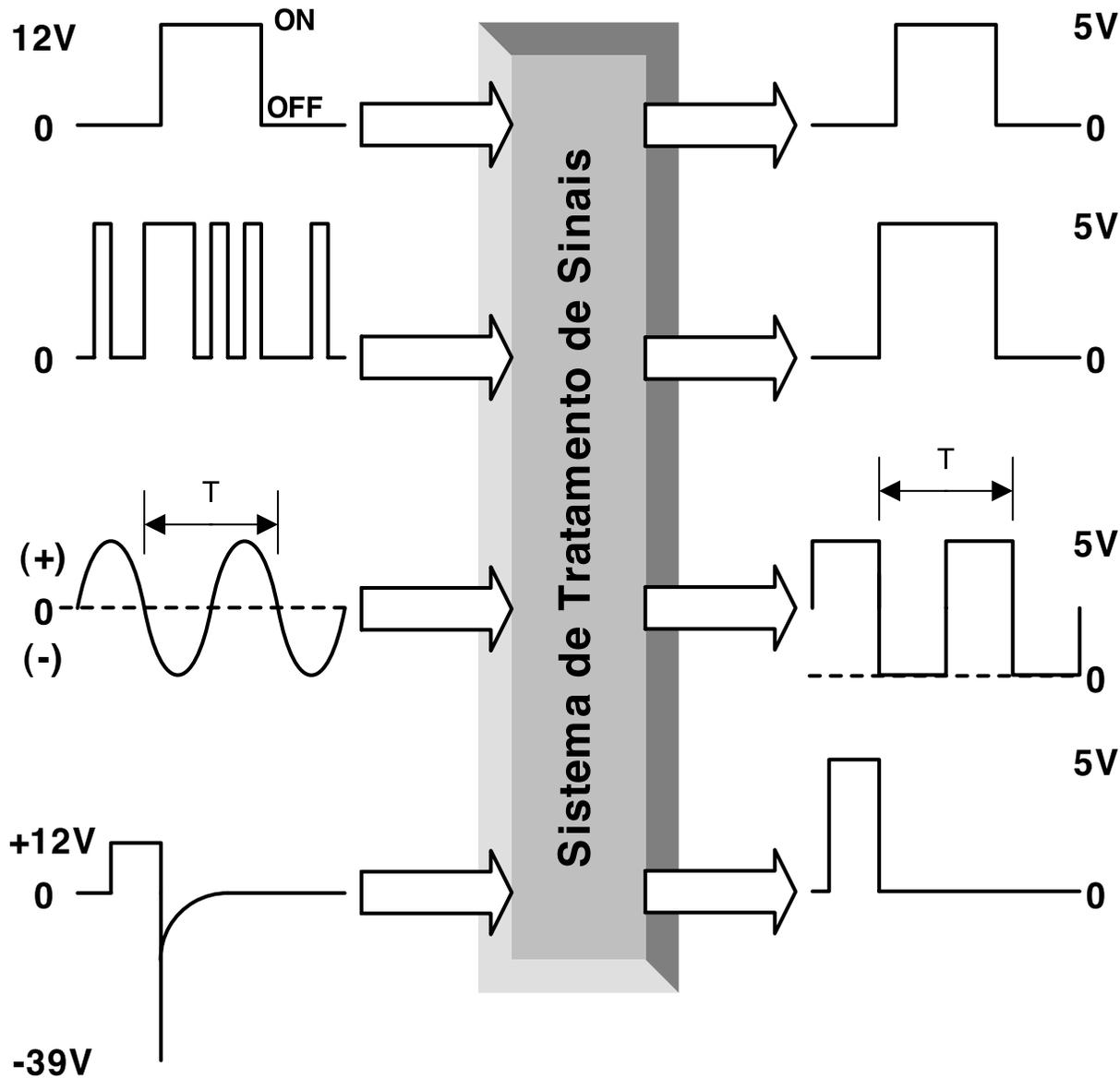


- **7.3. Processamento (condicionamento) do sinal**

- O uso imaginativo do processamento do sinal pode reduzir ou eliminar muitas das deficiências dos sensores e atuadores.
- O *processamento de sinal* é definido como qualquer operação realizada sobre o sinal passando entre o sensor e o atuador. O processamento converte o sinal do sensor num sinal elétrico apropriado para acionar o mostrador. Além disso, a acuracidade, confiança e a legibilidade da medida podem ser melhoradas.

- Através do processamento um sensor não linear pode parecer linear, ou sua resposta em frequência pode ser suavizada. Além disso, o processamento pode ser usado para converter unidades, formatação da leitura ou ainda para reduzir os efeitos dos erros aleatórios.
- O processamento de sinal pode ser realizado via dispositivos analógicos ou digitais.

• *exemplos:*



(a) sinais que excedem a tensão de alimentação.

(b) sinais com alto nível de ruído passando por filtro passa-baixa.

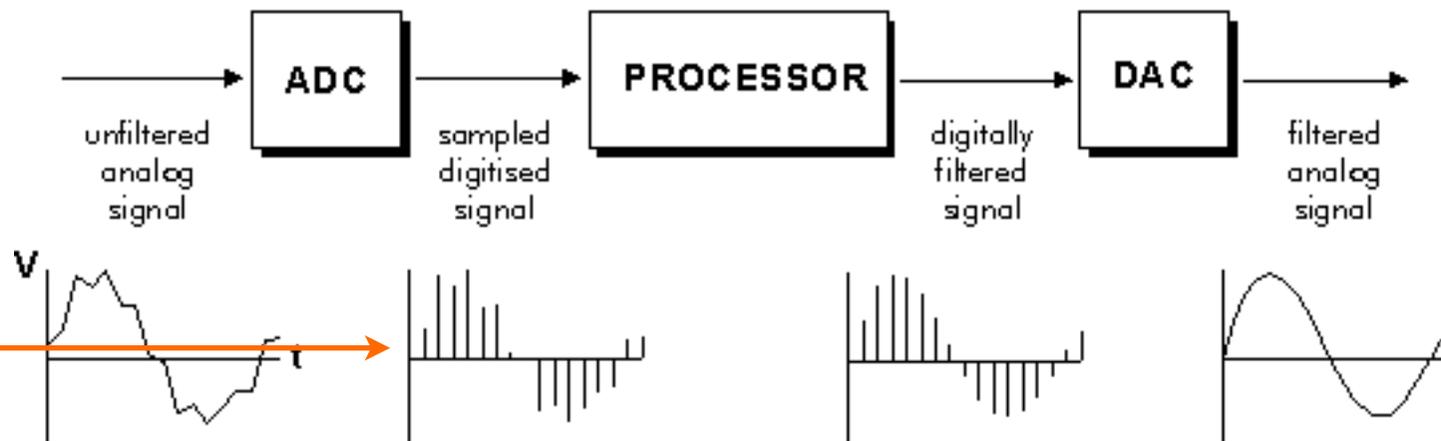
(c) sinais cuja tensão oscila entre valores positivos e negativos

(d) sinais que incluem tensões de repique.

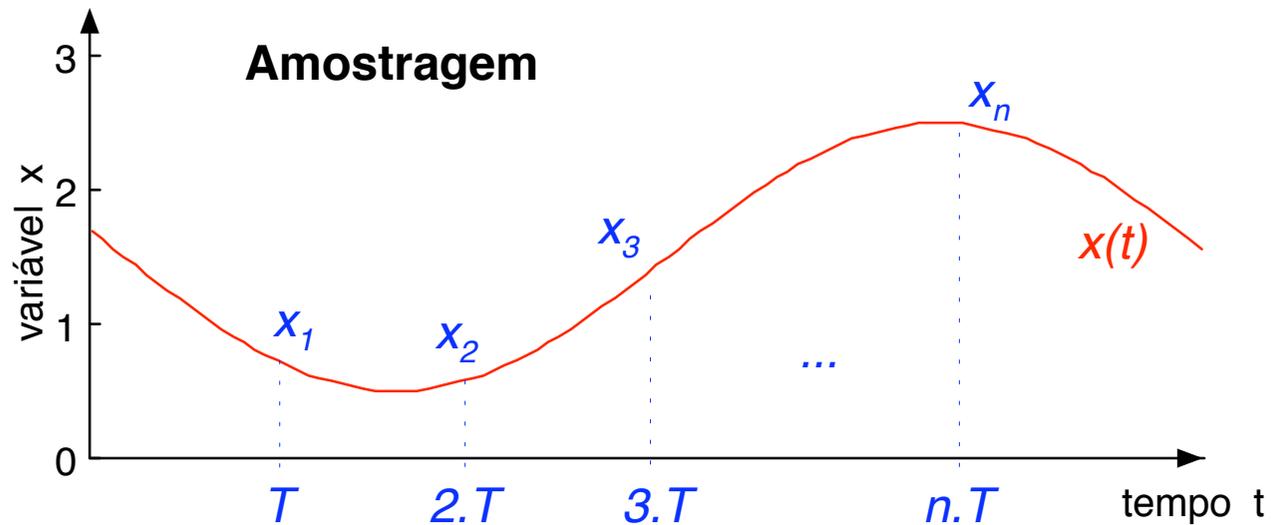
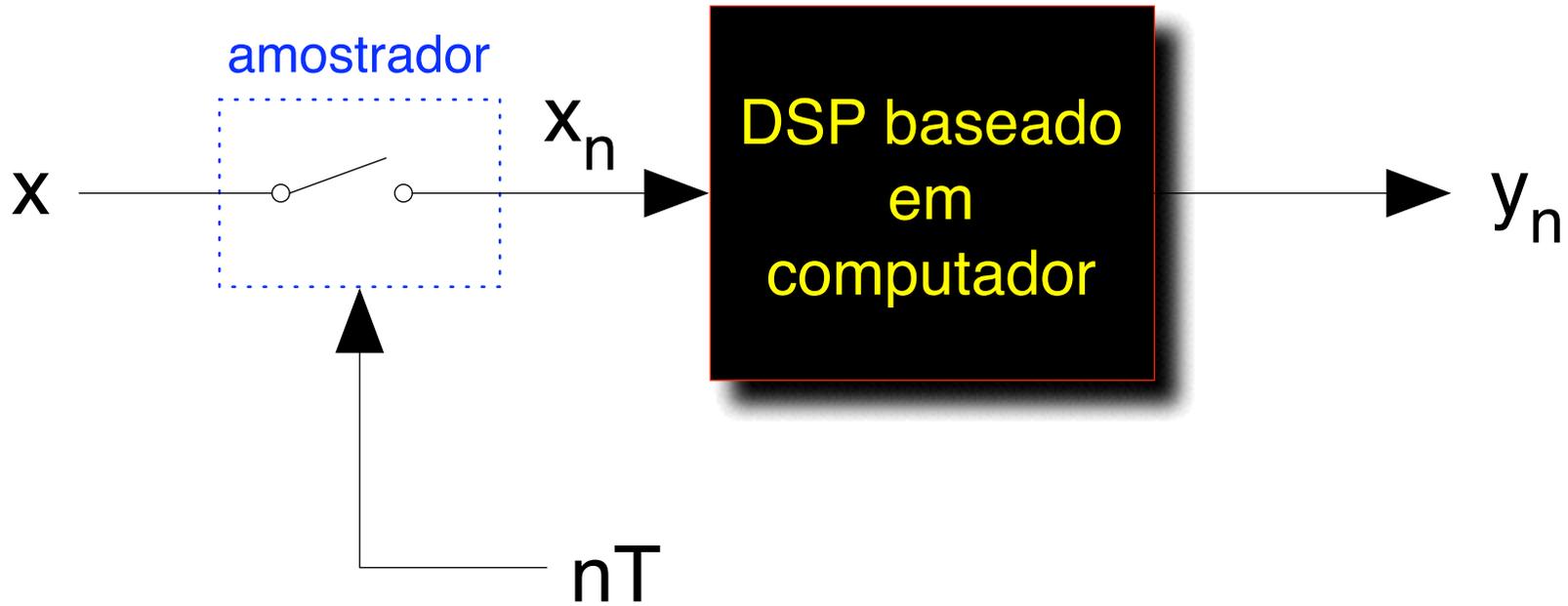
- ***processamento analógico***: utiliza filtros, amplificadores, somadores, multiplicadores e outros componentes analógicos. É a maneira tradicional.
- ***processamento digital (DSP)***: a tendência atual no processamento de sinal é que toda instrumentação elétrica seja digital. Nos sistemas DSP, o processamento do sinal é realizado numericamente por cálculos no processador digital de sinal (microprocessador ou microcontrolador).



- A **principal diferença** entre os dois processamentos, análogo e digital, envolve os instantes nos quais o sinal é representado.
- Enquanto o **sistema analógico** representa uma dada variável por meio de tensões analógicas continuamente, o **sistema digital** representa essa mesma variável numericamente em determinados instantes.

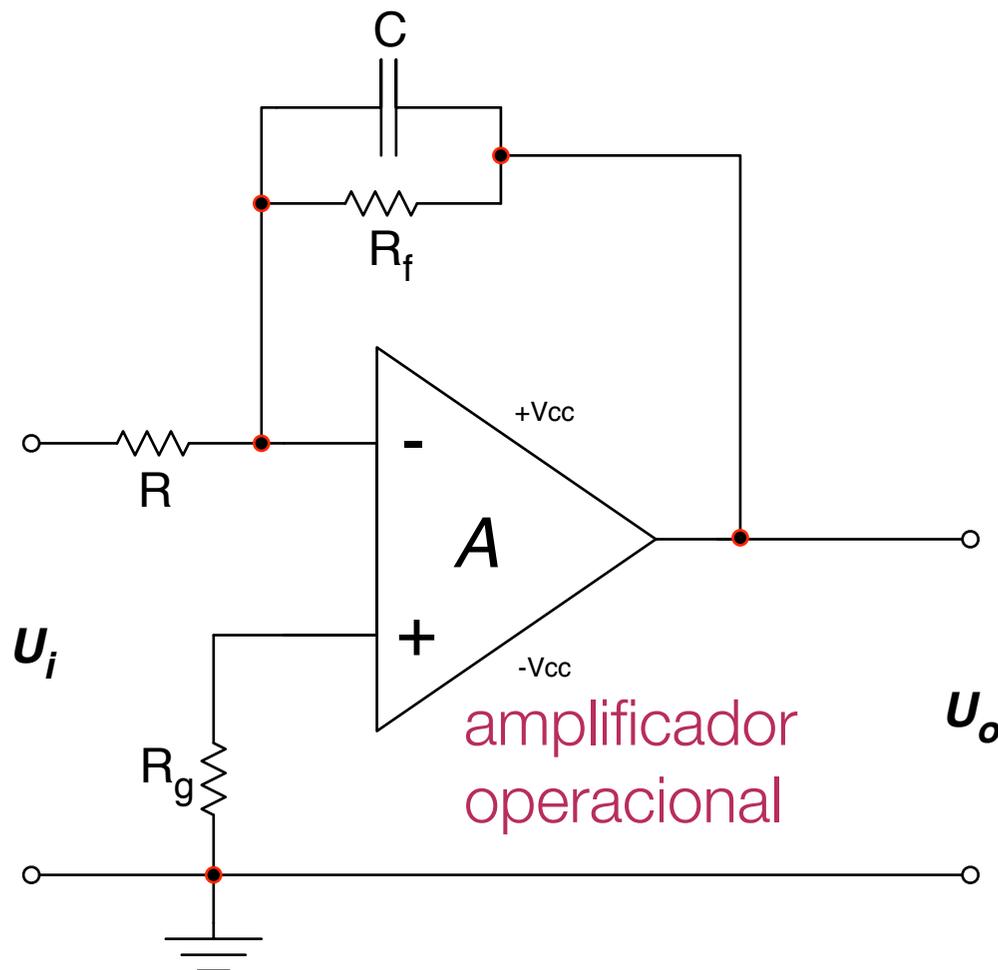


- Amostragem e processamento digital



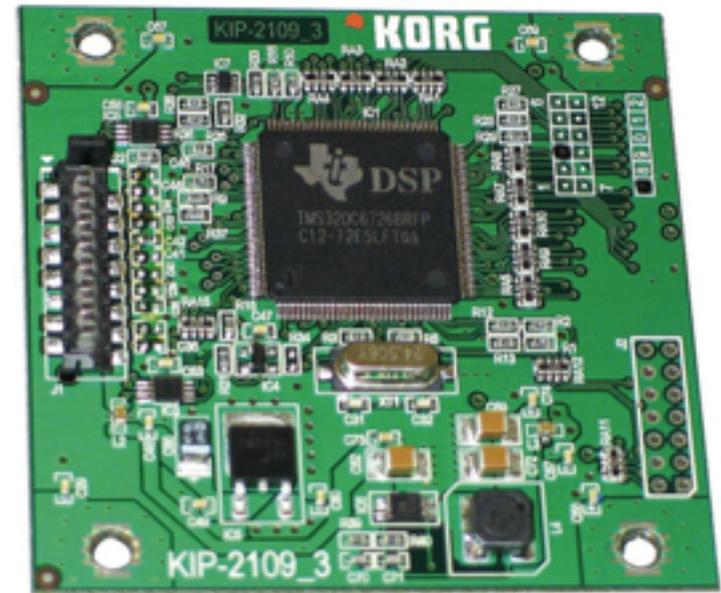
- Exemplos de processamento de sinais: filtros passa-baixas

analógico



digital

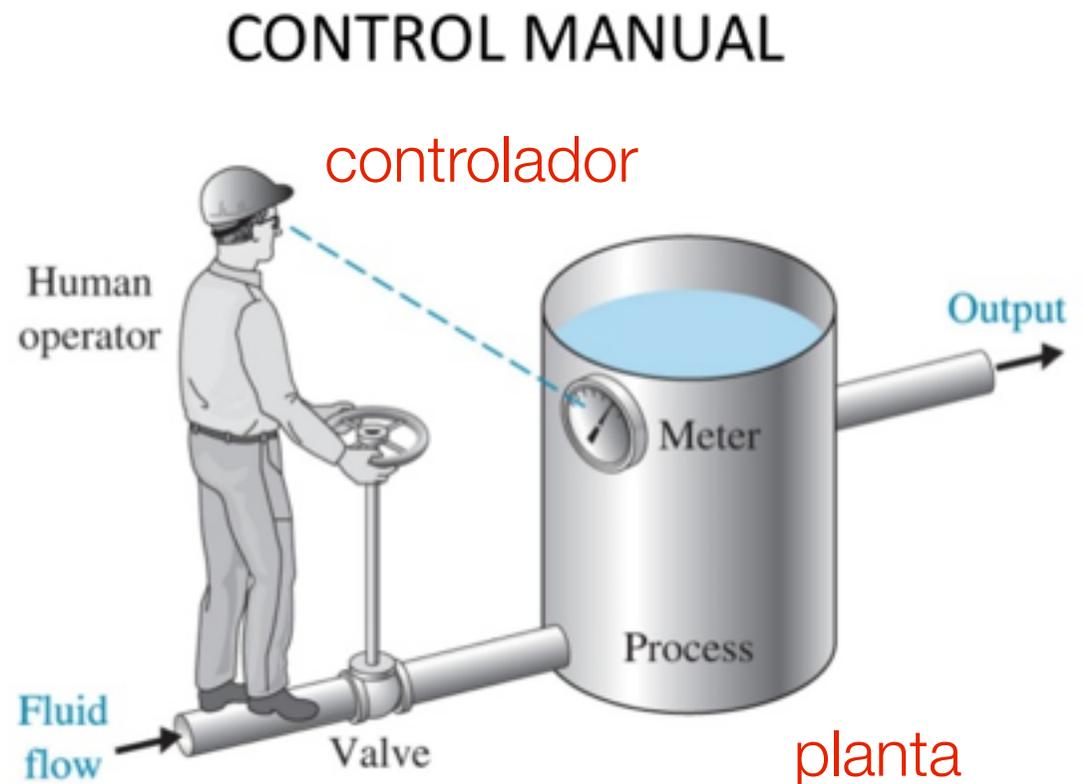
$$y_n = a \cdot x_n - b \cdot y_{n-1}$$



8. Sistemas de Controle

Sistemas de controle são sistemas que são usados para dirigir (comandar) a operação de outros sistemas (*plantas*).

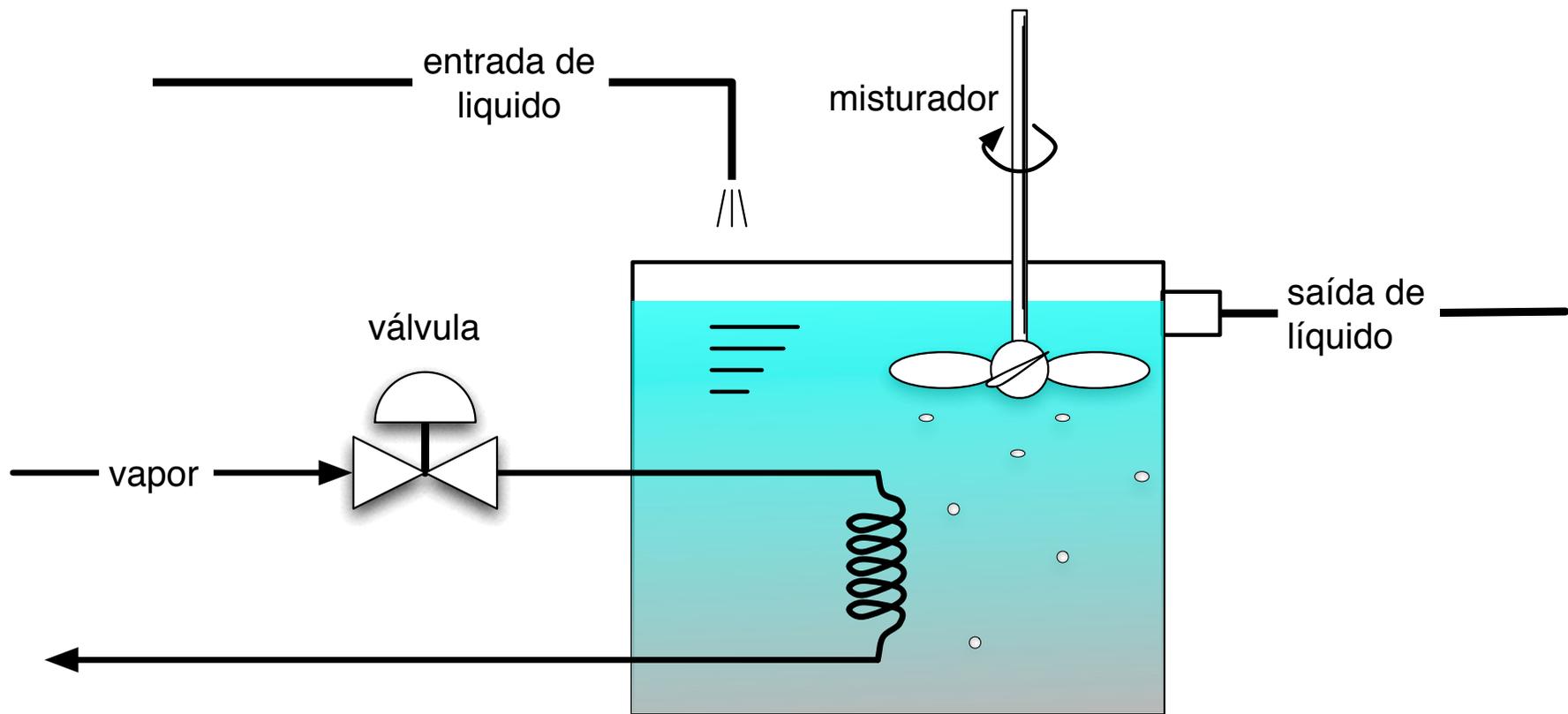
O **objetivo** de um projetista de **sistemas de controle automáticos** é melhorar o desempenho da planta em relação à sua entrada de acordo as características de operação ou do controlador.



Um sistema de controle **deve**:

- ser acurado (erro próximo de zero);
- responder rapidamente;
- ser estável;
- responder apenas a entradas válidas (deve ser imune a ruídos);

- **planta:** é qualquer objeto físico a ser controlado, como por exemplo: um forno, um motor, um automóvel, uma aeronave, um reservatório, um processo, etc.

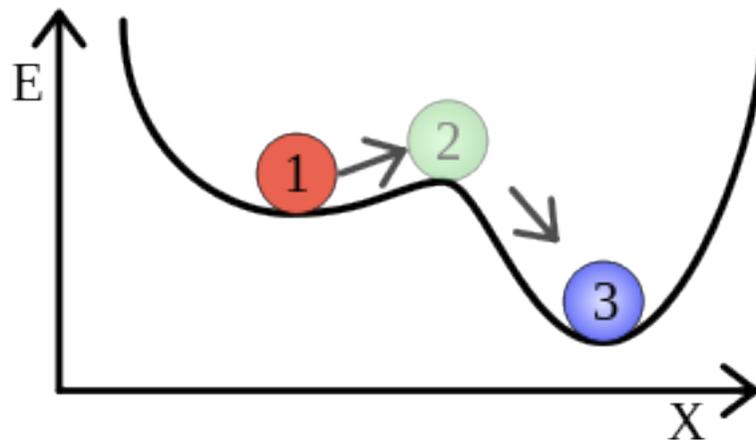


- **8.1. Acuracidade (exatidão)**

- A acurácia de um sistema de controle determina quão perto a resposta da planta está da resposta desejada, sob um comando de entrada, sob um comando de entrada constante.
- Um sistema deve manter sua acurácia respondendo apenas a entradas válidas.
- Um bom projeto eliminará qualquer tentativa de modificação da resposta por parte dos ruídos e outros distúrbios.

• 8.2. Estabilidade

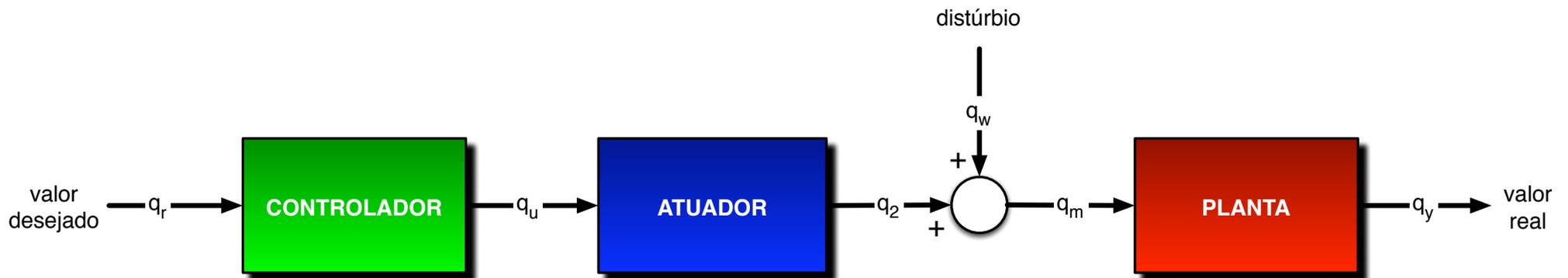
- A estabilidade descreve como o sistema se comporta sob uma mudança repentina no sinal de entrada ou sob ação de uma perturbação.
- Um bom projeto de controlador minimizará as chances de operação instáveis.



- **8.3. Controlabilidade**

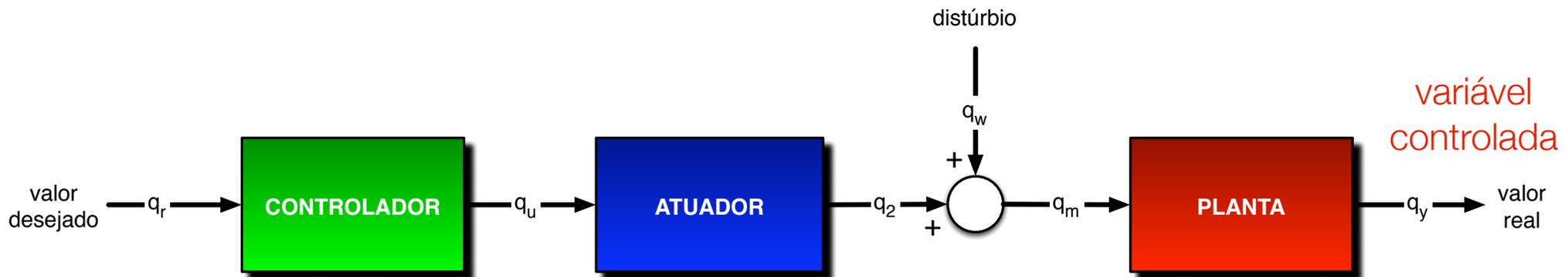
- A relação entre a saída do controlador e ou a resposta da planta ou o erro atuante é chamada de lei de controle (*control law*) para o sistema.
- Controlabilidade tem a ver com a relação entre esforço e o erro atuante.
- O valor desejado para a resposta planta é chamado de ponto de ajuste (*set point*).

- O comportamento da planta é influenciado eletronicamente por um dispositivo eletromecânico chamado de *atuador*.
- Por meio de um processo interno de conversão de energia eletromecânica é obtida uma saída mecânica, que opera o controle da planta.



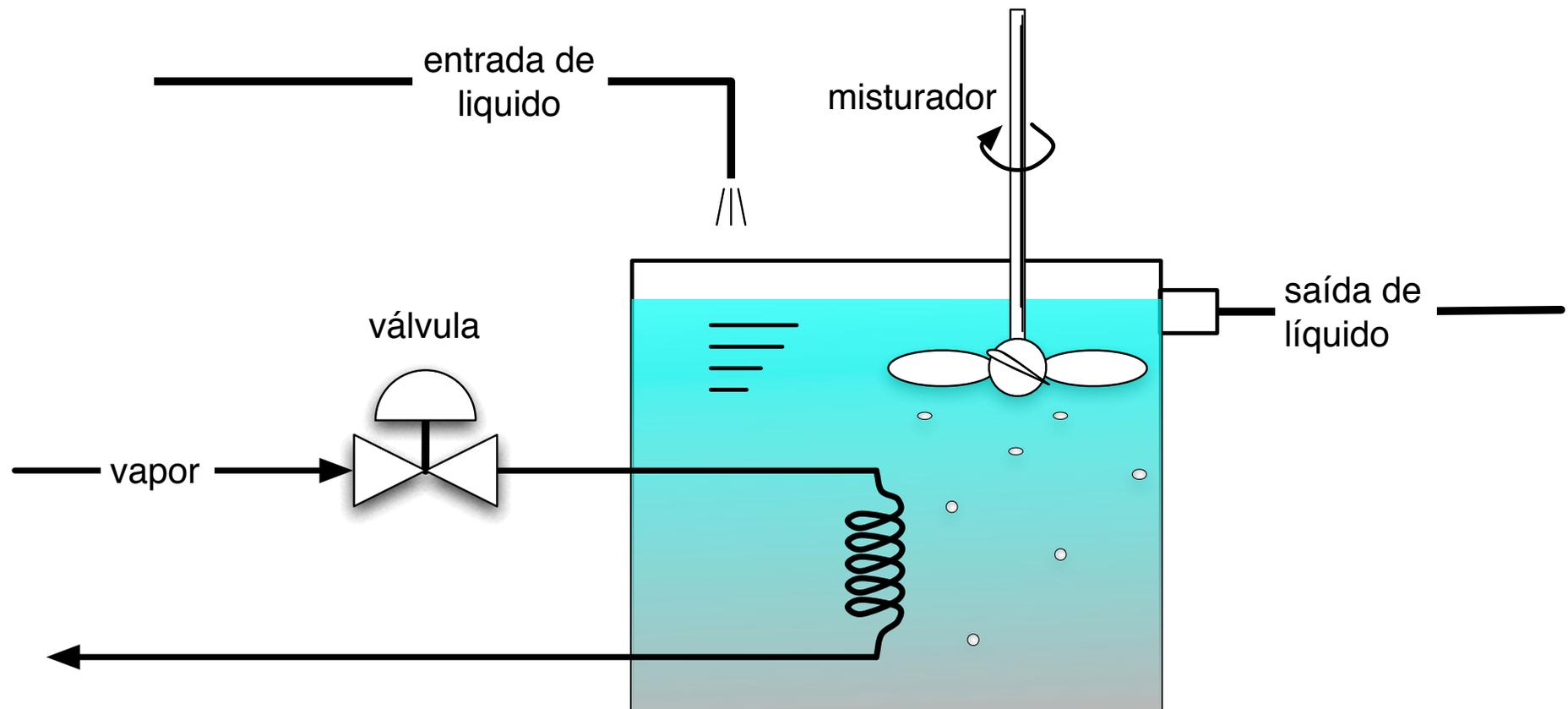
- **8.4. Sistema de Controle em Malha Aberta**

- Os sistemas de controle de malha aberta são aqueles nos quais a informação sobre a variável controlada q_y não é usada para ajustar nenhuma das entradas do sistema para compensar as mudanças das variáveis do processo.



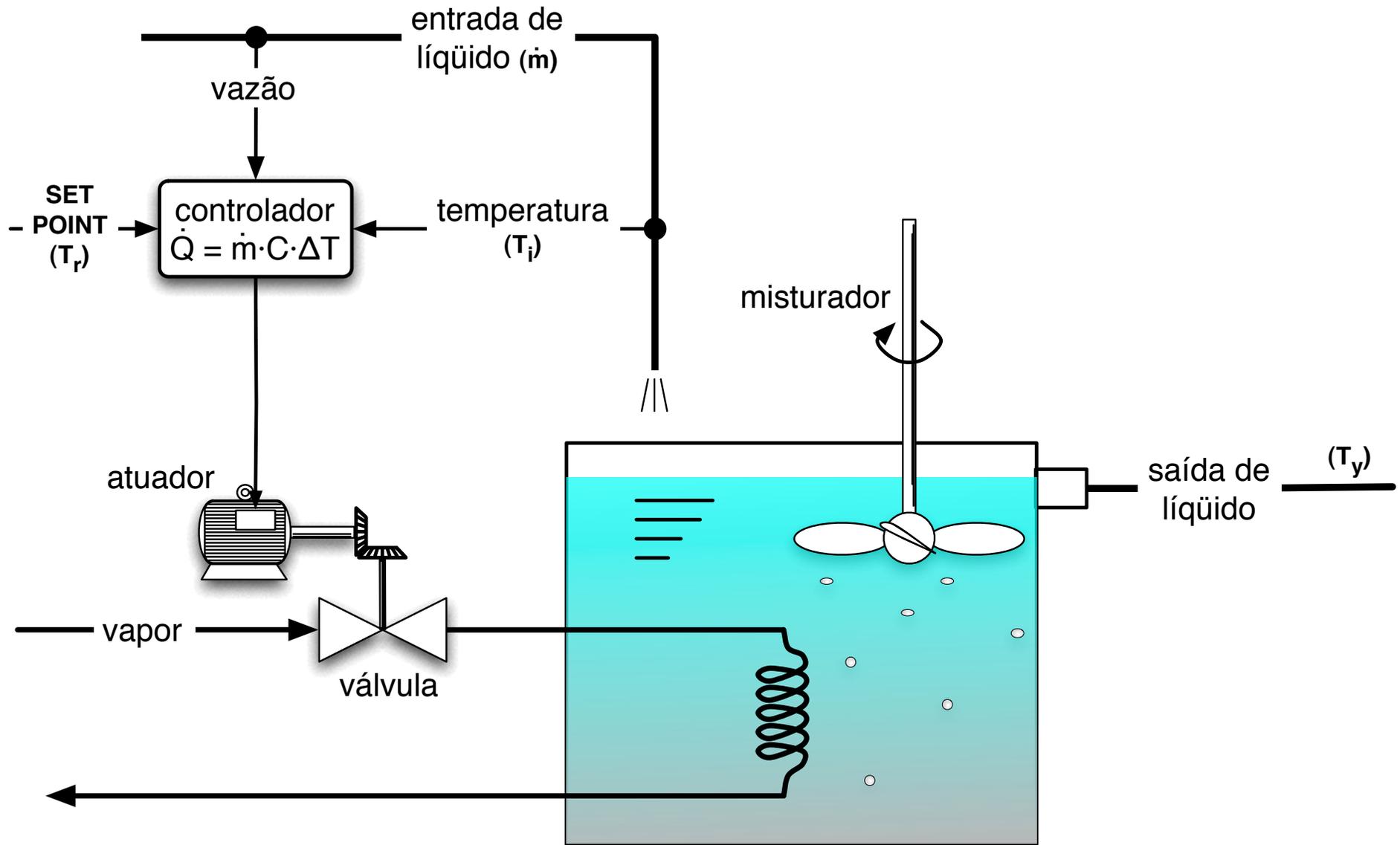
- Esse sistema é incapaz de compensar mudanças que podem ocorrer no controlador e/ou na planta.

- **exemplo:**



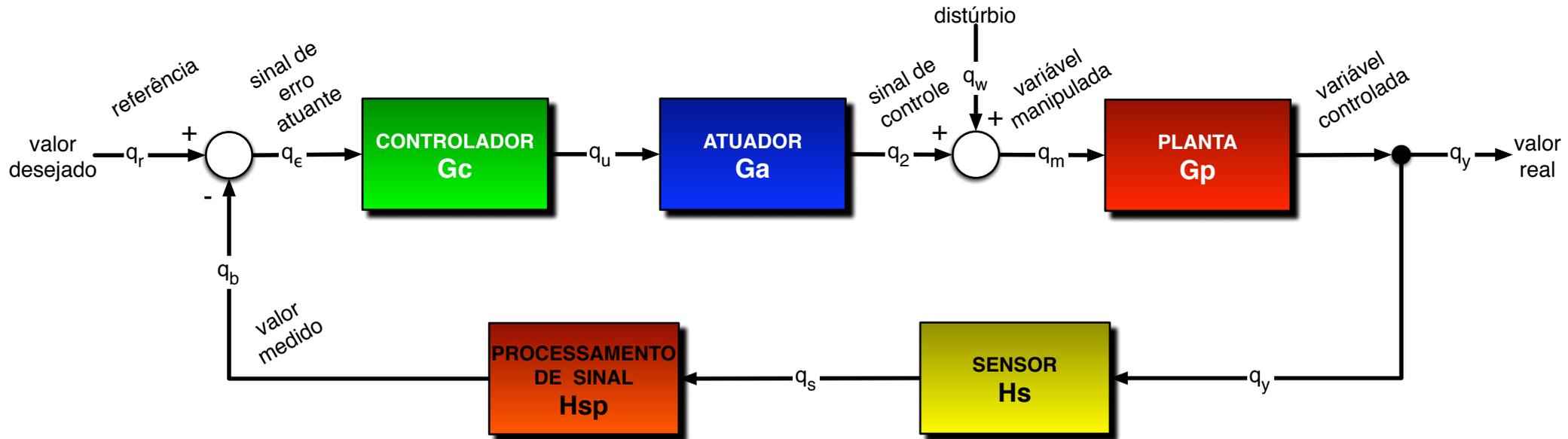
- **8.4.1. Sistema de Controle Pré-Alimentado (*Feed-Foward*)**
- Os sistemas de controle pré-alimentados podem ser considerados **um tipo mais elaborado de sistema de controle *malha aberta***.
- Distúrbios do processo são medidos e compensados sem se esperar que uma mudança na variável controlada indique que um distúrbio ocorreu. O controle pré-alimentado é também útil quando a variável controlada não pode ser medida.

• *exemplo:*

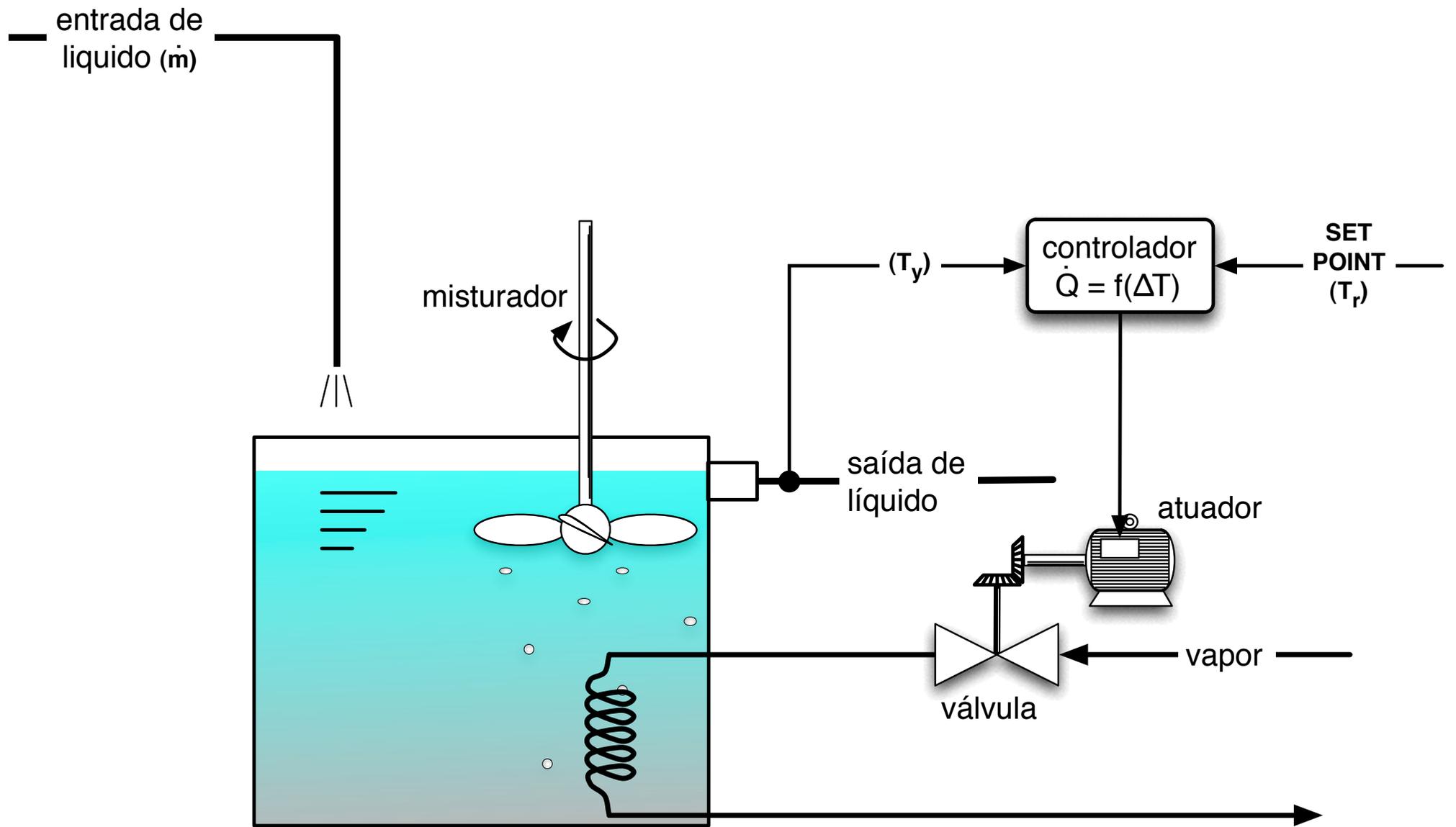


• 8.5. Sistema de Controle em Malha Fechada

- O condicionamento (processamento) do sinal em controle é similar àquele na instrumentação.



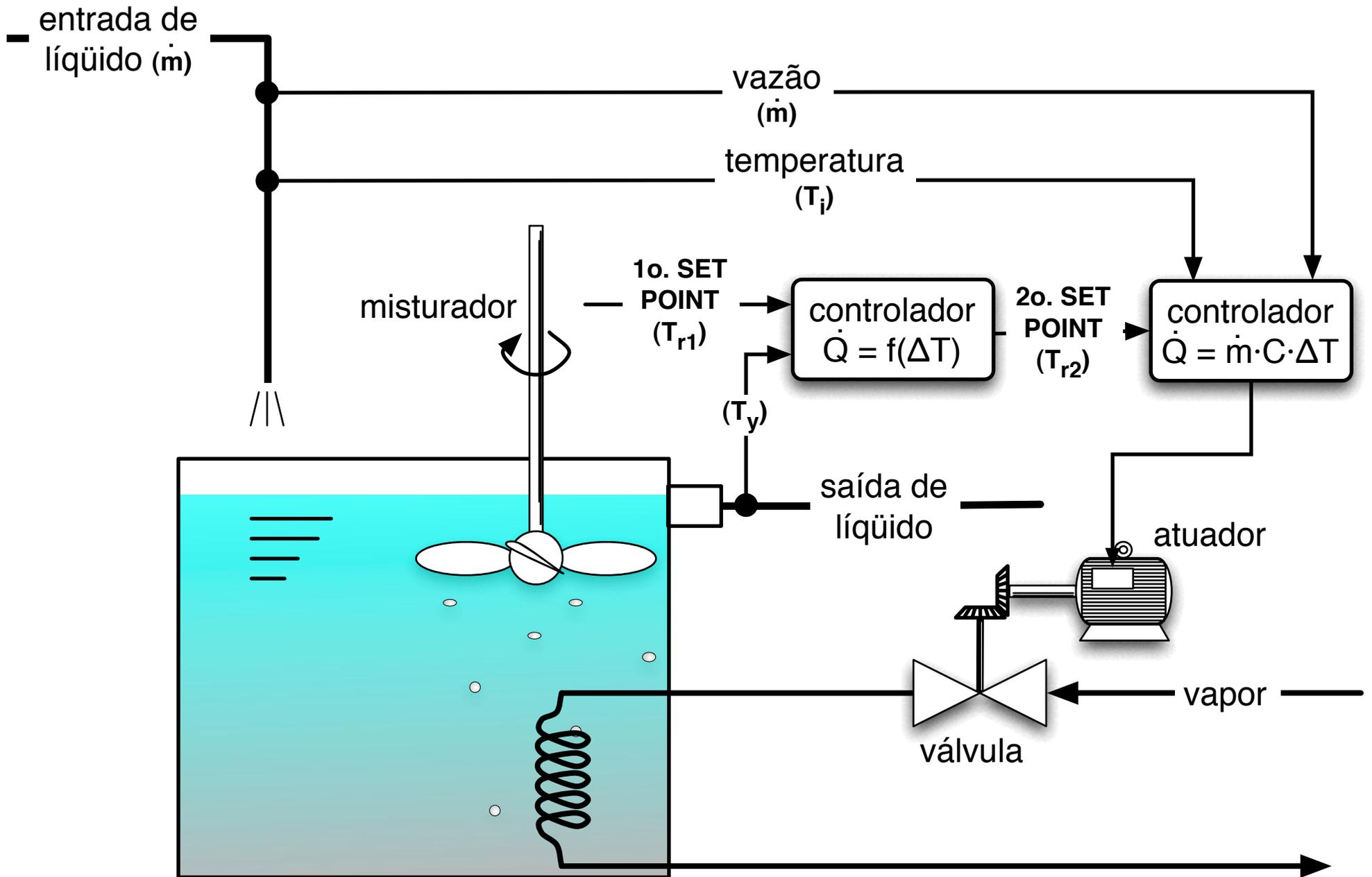
• *exemplo:*



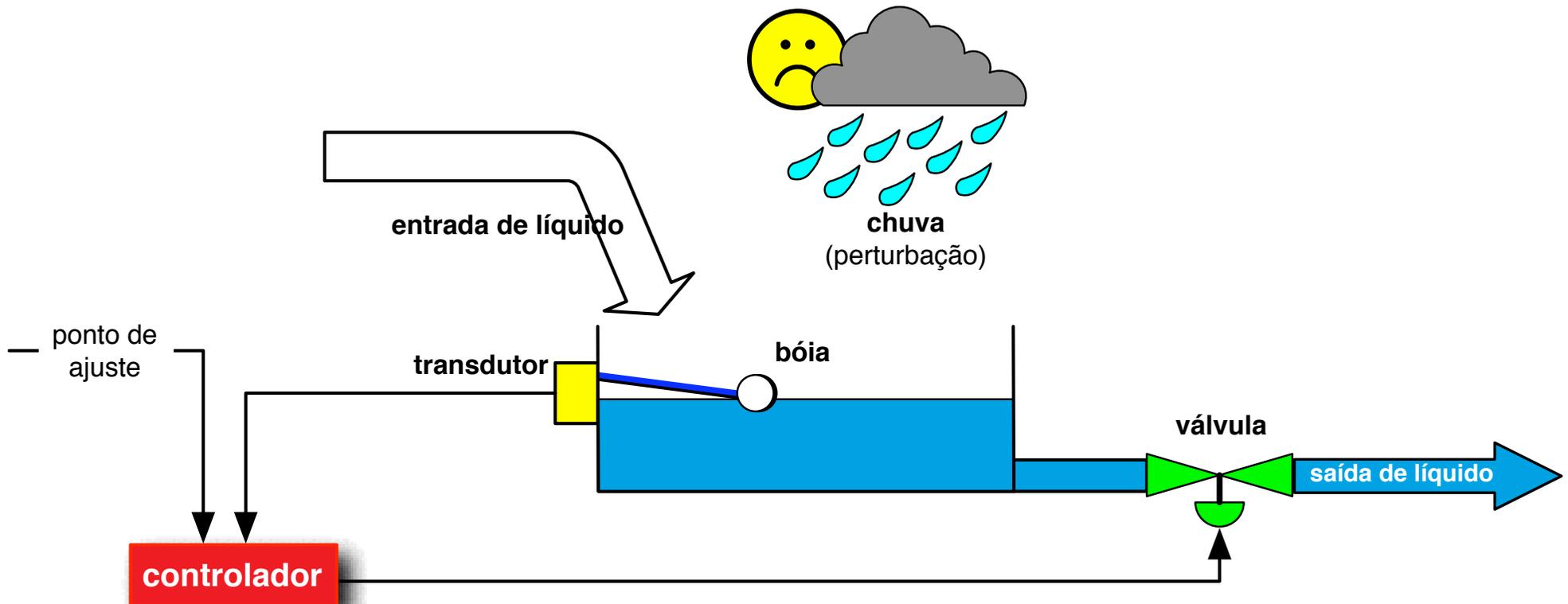
- **8.6. Sistema de Controle Misto**

- Como são raros os modelos e controladores perfeitos; é vantajosa uma combinação de controle pré e realimentado.
- O arranjo de um controlador fornecendo o ponto de ajuste para outro controlador é conhecido como *controle em cascata* e é comumente usado no controle por realimentação.

• *exemplo:*



- **8.7. Resposta a distúrbios**

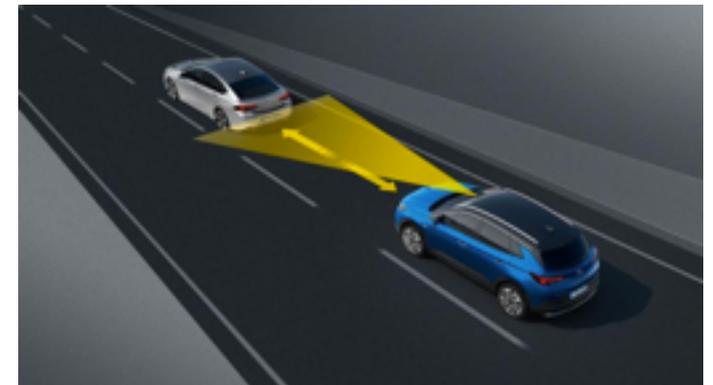


- outro exemplo:

- Um sistema de controle de velocidade de cruzeiro (*cruise control*) é acionado em pavimento nivelado (plano horizontal).



- Quando o veículo encontra uma subida, a mudança que ocorre na carga do motor é considerada distúrbio.



- **8.8. Ações de Controle**

I. proporcional (P)

II. integral (I)

III. proporcional mais integral (PI)

IV. proporcional mais derivativa (PD)

V. proporcional mais integral mais derivativa (PID)

- **8.8.1. Ação de Controle Proporcional**

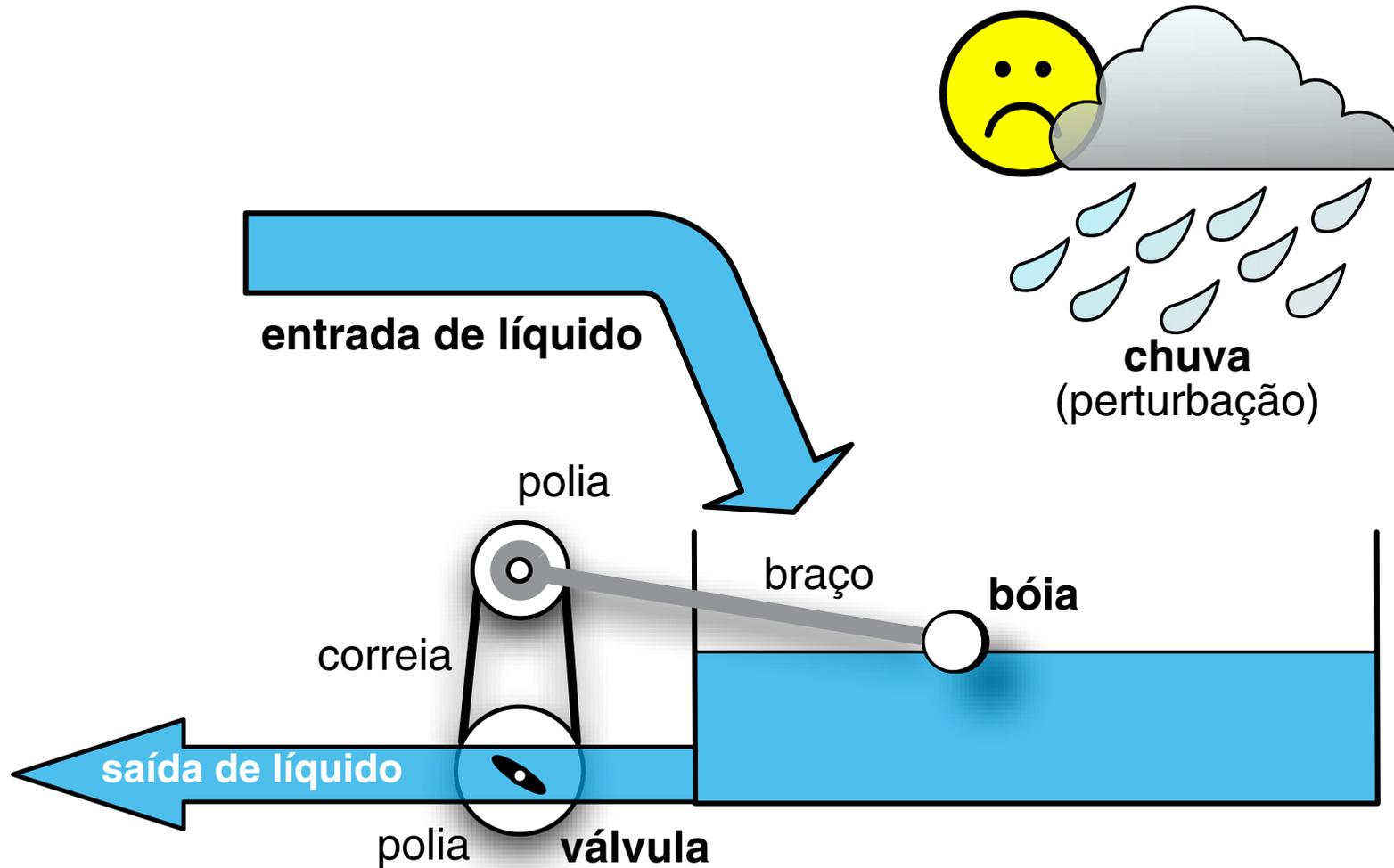
- definição:

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \quad \text{analógico}$$

ou:

$$u(kT) = K_p \cdot \varepsilon(kT) \quad \text{digital}$$

- **exemplo:** ação de controle P



$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t)$$

- **8.8.2. Ação de Controle Integral**

- definições:

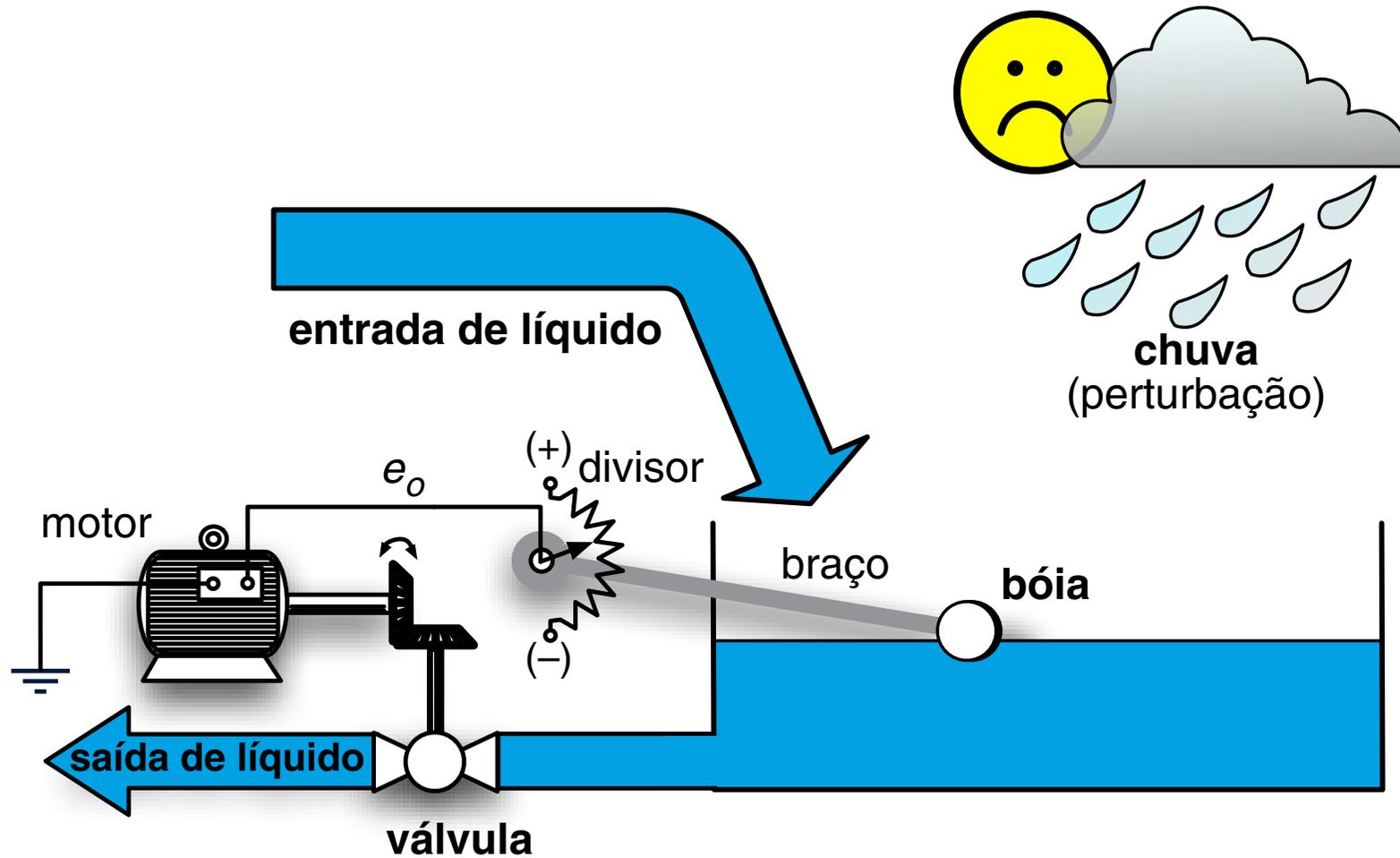
$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot \varepsilon(t)$$

$$u(t) = K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$$

ou:

$$u(kT) = u(kT - T) + K_i \cdot \varepsilon(kT) \cdot T$$

- **exemplo:** ação de controle I



$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot \varepsilon(t)$$

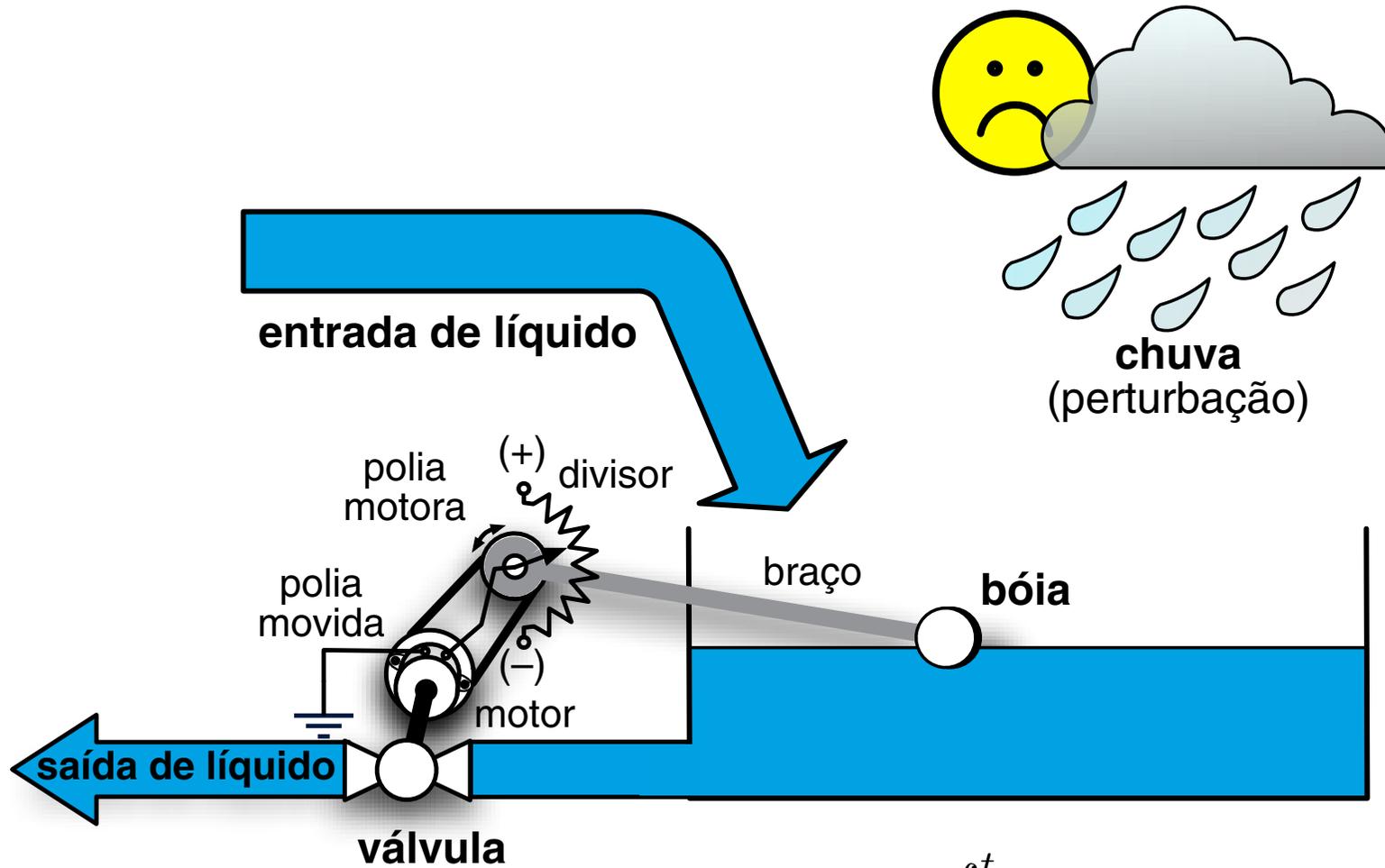
- **8.8.3. Ação de Controle Proporcional e Integral**

- definições:

$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$$

$$u(kT) = K_p \cdot \varepsilon(kT) + u(kT - T) + K_i \cdot \varepsilon(kT) \cdot T$$

- **exemplo:** ação de controle PI



$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$$

- **8.8.4. Ação de Controle Proporcional e Derivativa**

- definição:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

ou:

$$u(kT) = K_P \cdot e(kT) + K_D \cdot \frac{e(kT) - e(kT - 1)}{T}$$

- **8.8.5. Ação de Controle Proporcional mais Integral mais Derivativa**

- definição:

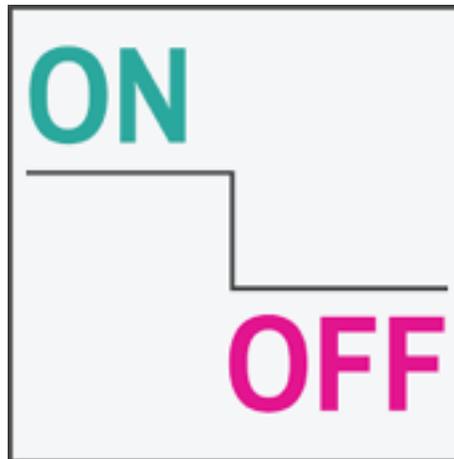
$$u(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

ou:

$$u(kT) = K_p \cdot \varepsilon(kT) + u(kT - T) + K_i \cdot \varepsilon(kT) \cdot T + K_d \cdot \frac{\varepsilon(kT) - \varepsilon(kT - T)}{T}$$

- **8.8. Controle malha fechada em ciclo limite: (sistemas ON-OFF)**
- O controle via ciclo limite é um tipo de controle malha fechada que monitora a resposta do sistema e responde apenas quando a resposta ultrapassa certos limites pré-estabelecidos.
- Esses sistemas de controle são usados para controlar plantas com funções de transferência complicadas ou não lineares.

- Esse sistema controla a planta de maneira a manter um valor médio próximo do comando de entrada. Esse tipo de sistema ganhou popularidade devido sua simplicidade, baixo custo e facilidade de aplicação.
- O controle do combustível, um dos mais importantes sistema de controle automotivo, é em parte, um sistema ON-OFF.



Bibliografia

- RIBBENS, W. B (1992) Understanding Automotive Electronics, SAMS, 4th Ed. ISBN 0-672-27358-6.
- OGATA, K. (1993) Engenharia de Controle Moderno, Prentice Hall, 2^a. Ed.
- DOEBELIN, E. Control Systems: Principles and Design, John Wiley & Sons. ISBN 0-0471-08815-3
- DOEBELIN, E. Measurement Systems: Application and Design, John Wiley & Sons. ISBN 978-0070173385