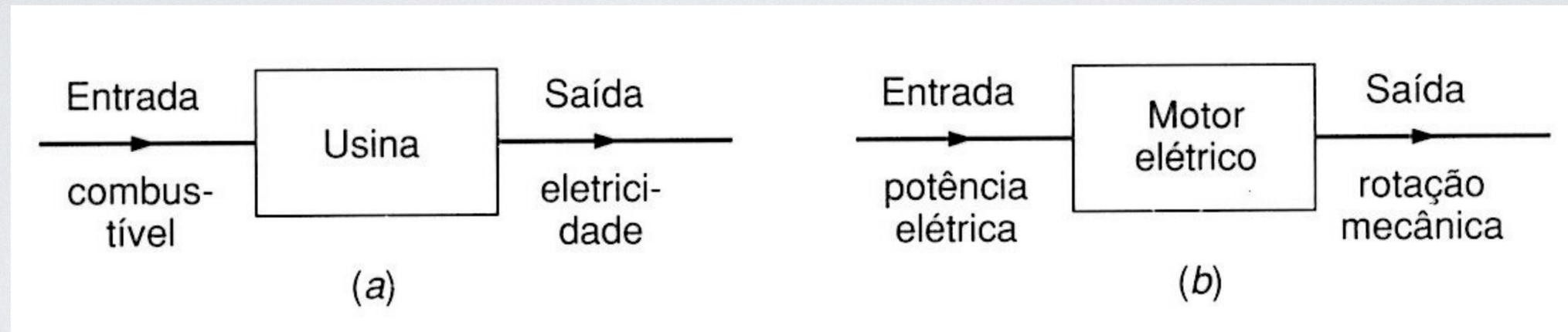


INTRO CONTROLE I

Conceitos Iniciais

Prof. Dr.Eng. Fernando Passold

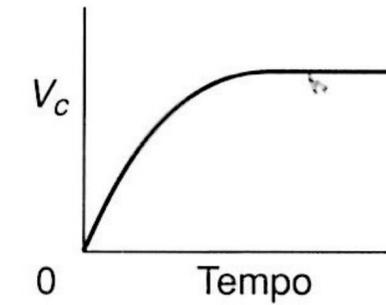
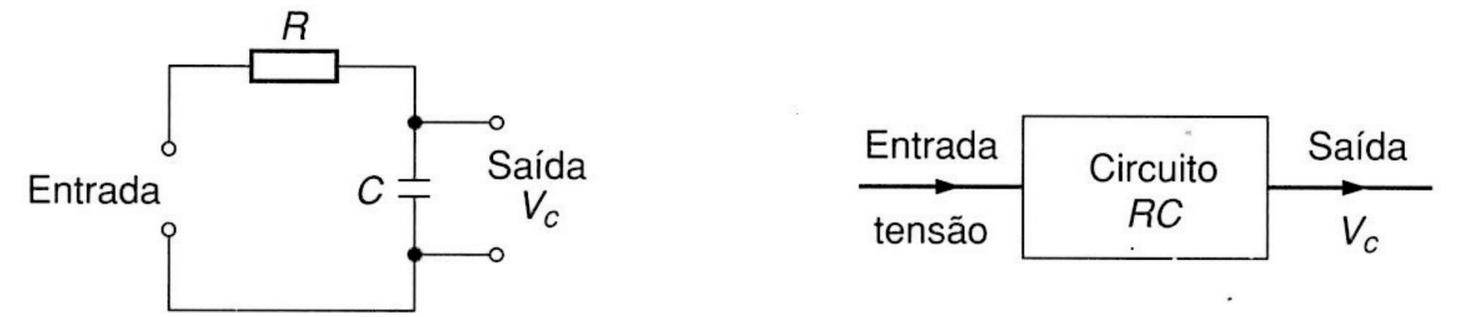
“SISTEMAS”



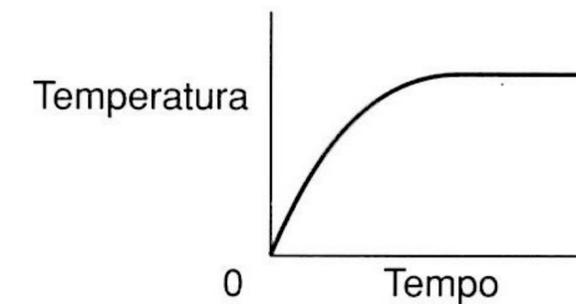
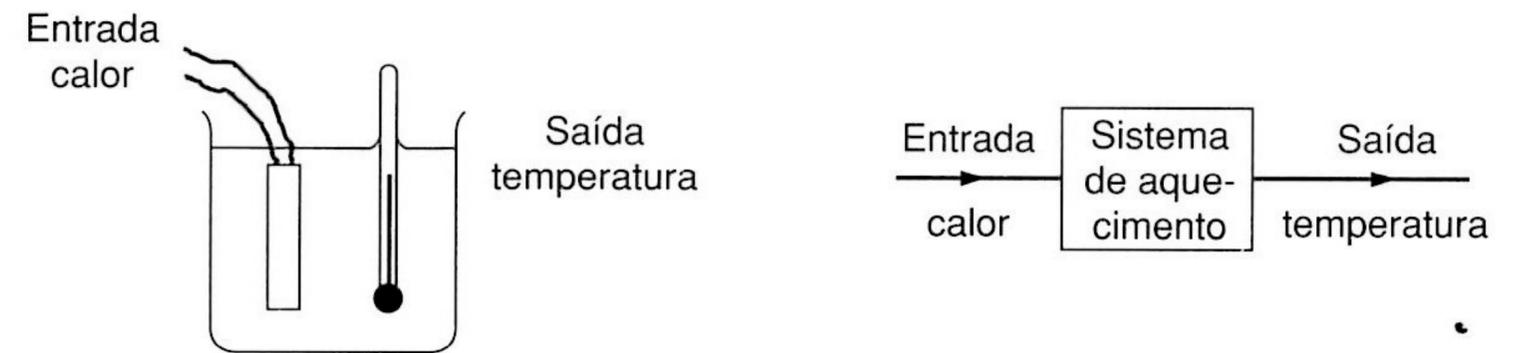
- O termo **sistema** é usado para descrever uma série de componentes que interagem em torno de um condição limite imaginária, e somente a entrada e a saída são de interesse, ou seja, não há necessidade de explorar as interações detalhadas entre os componentes.
- RESUMINDO: o que importa mesmo num sistema, é a relação entre as entradas e saídas

“SISTEMAS”

- “SISTEMAS”: Estabelecer relações entre saídas e entradas.
- **Vantagens** (ao estudar sistemas deste forma) é que que embora exista uma grande variedade de sistemas possíveis, as relações entre a entrada e a saída de muitos deles podem ser similares.



(a)



(b)

Figura 1.2 Sistemas semelhantes: (a) um circuito RC e (b) um sistema de aquecimento.

SUBSISTEMAS . . .

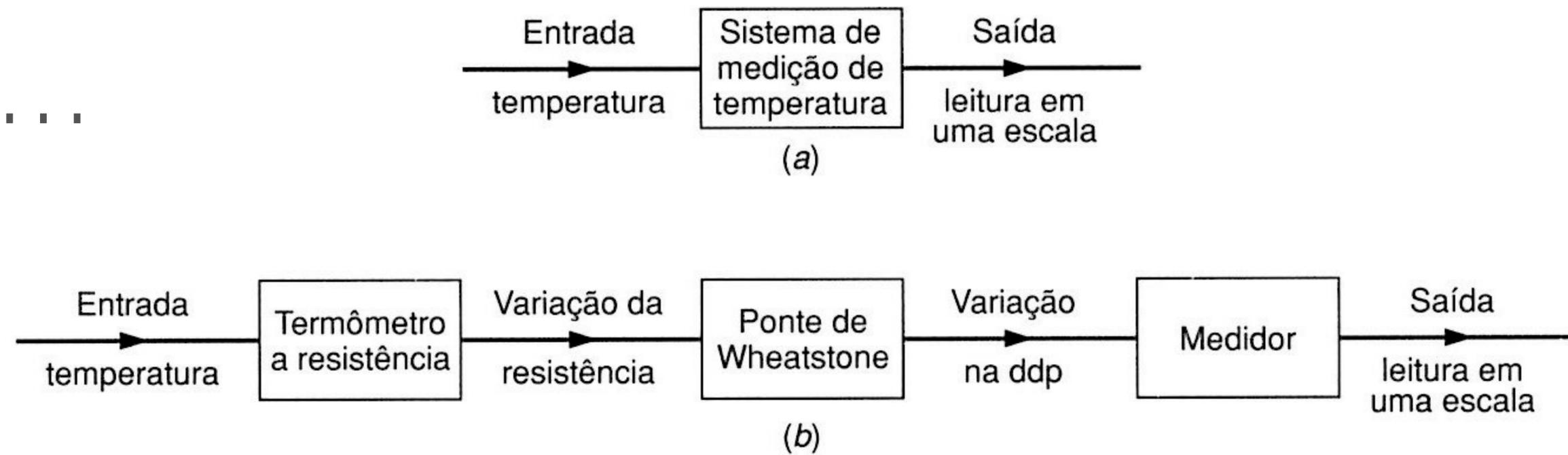


Figura 1.3 Um sistema de medição de temperatura.

- Em algumas situações, é conveniente dividir o sistema em vários subsistemas acoplados.
- Ex. Sistema de medição de temperatura (figura).
Ele consiste num sensor resistivo ligado a uma ponte de Wheatstone com saída mostrada num medidor (bobina de ferro móvel). O sistema poderia ser resumido à figura (a) ou representado com um pouco mais de detalhes, como mostrado na figura (b).

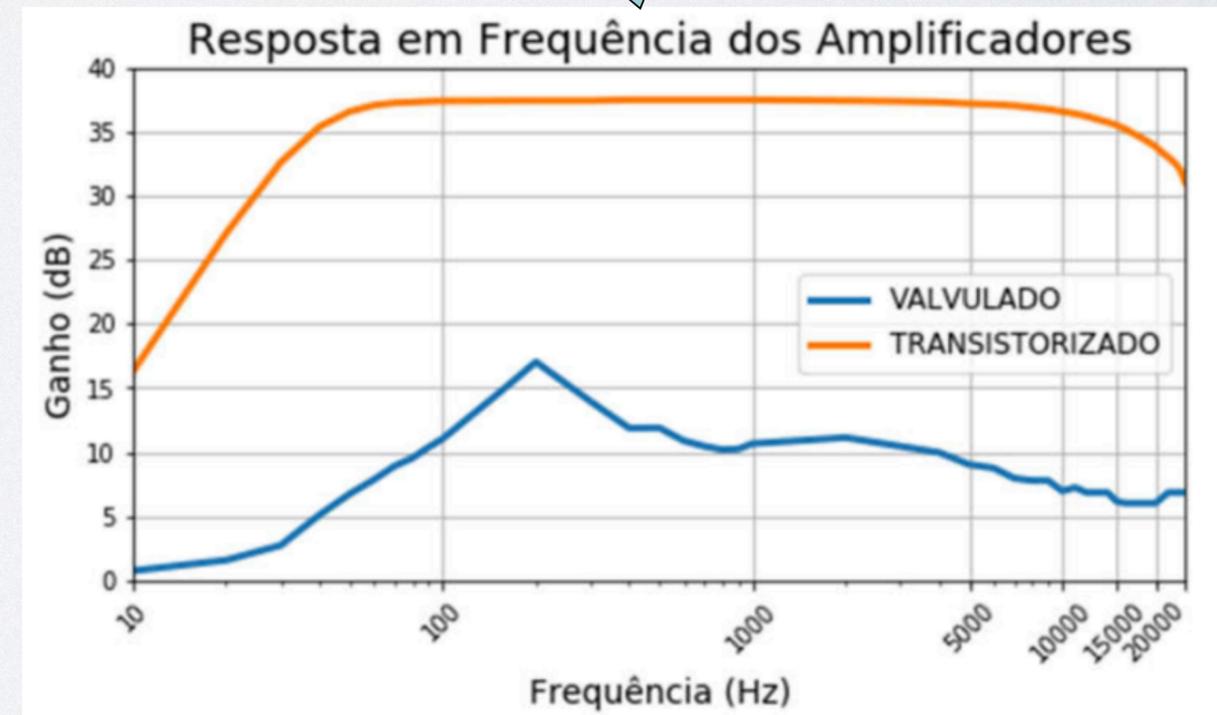
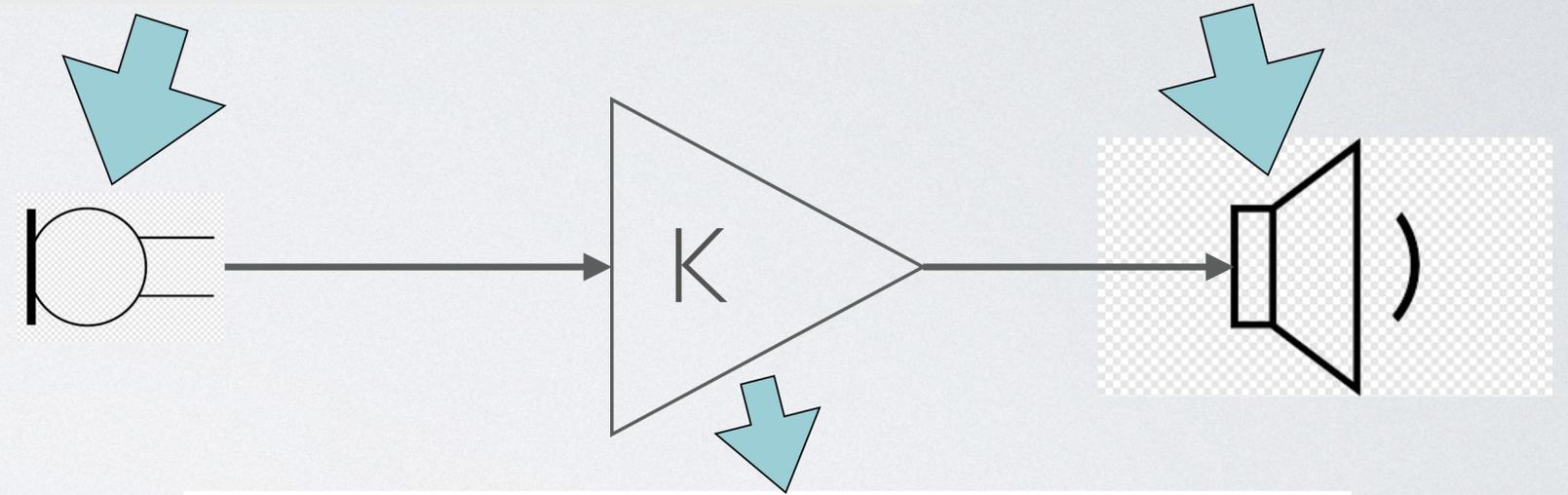
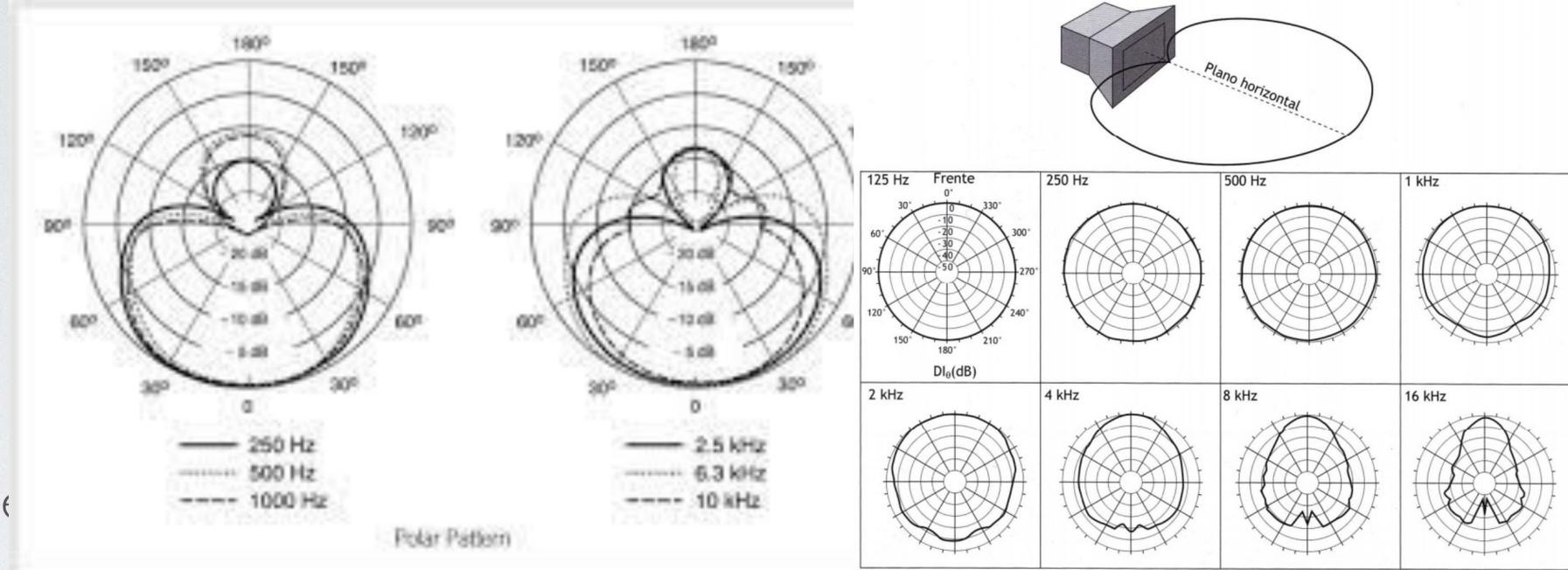
MODELOS

- Um “modelo” pode ser uma versão física reduzida de um sistema real (um carro, uma aeronave, etc). Note que neste caso, um “fator escala” é respeitado entre seus componentes.
- Ex.: um mapa seria um modelo de um território: as distâncias e localizações das cidades no mapa possuem as mesmas relações que ocorrem entre as cidades localizadas em terra.
- Em suma, um modelo é apenas um meio de transferir alguma relação de sua forma real para outra forma.



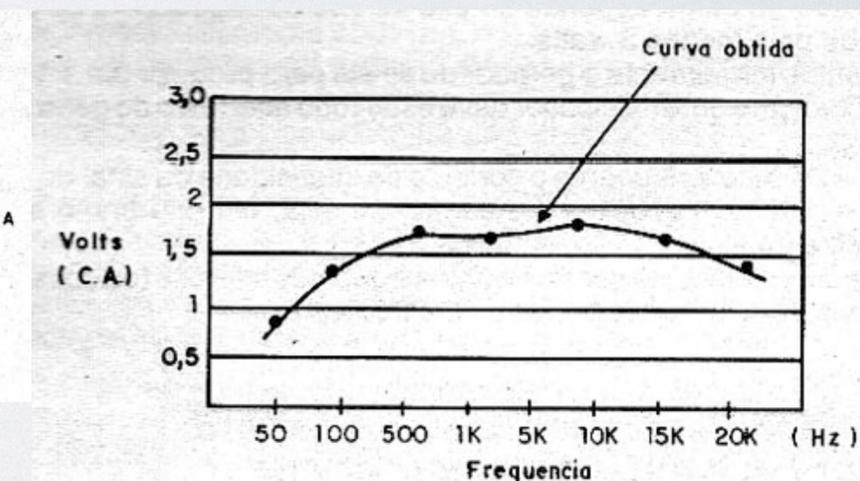
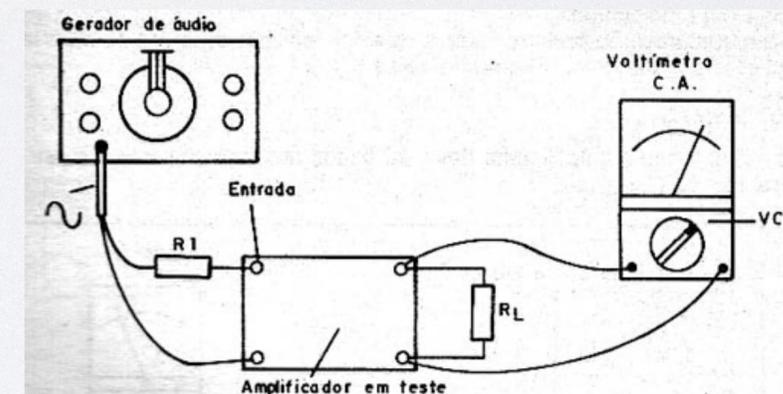
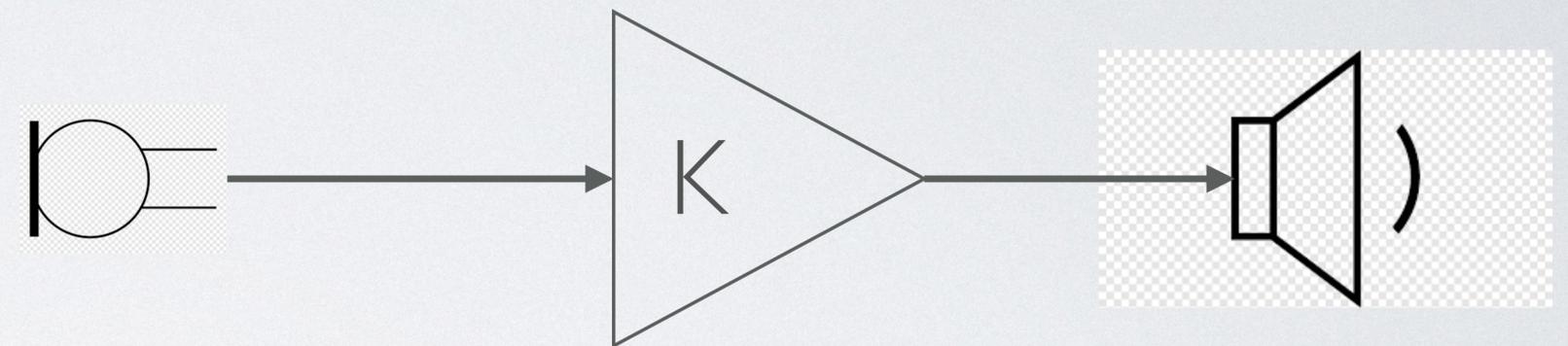
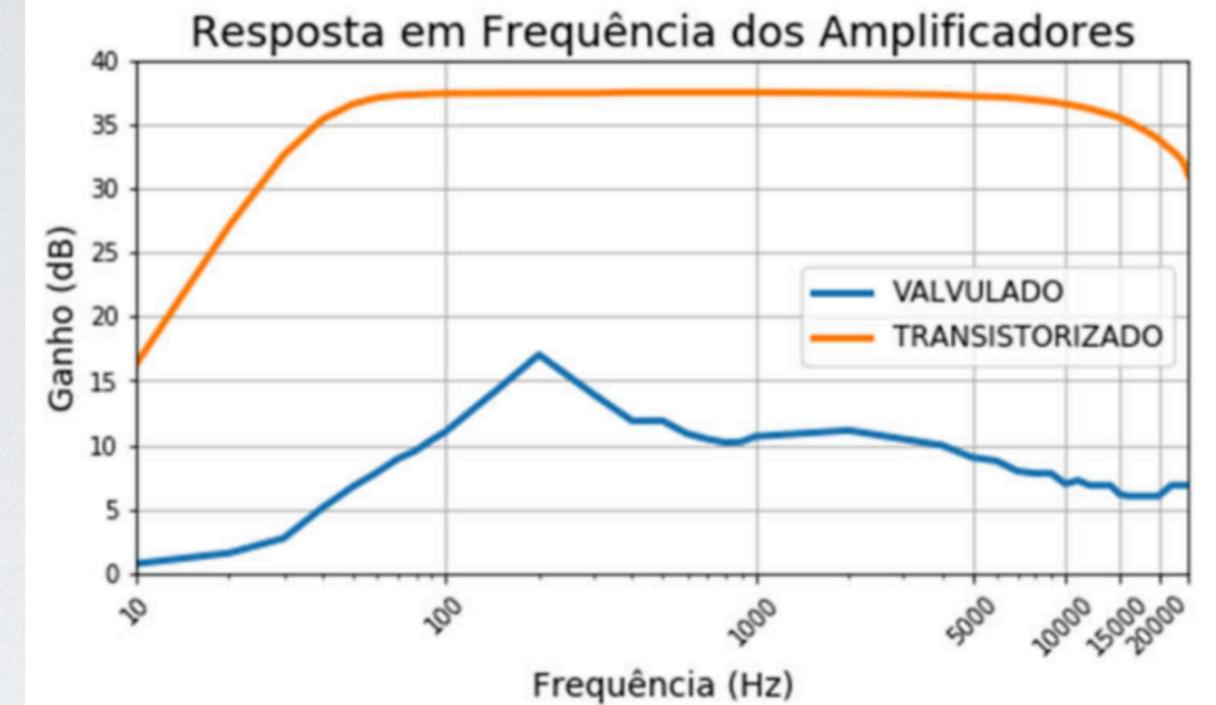
MODELOS

- A **análise** de um modelo permite transferir relações de interesse.
- Um bloco com linhas e setas para indicar o sentido da entrada e da saída é um modelo para um sistema.
- As relações transferidas do sistema real para o modelo são as **relações entrada/saída**.
- Podemos usar um "kit" básico para construir uma série de sistemas. Seus blocos são subsistemas ou elementos de sistemas com características próprias de entrada/saída. Por exemplo, um amplificador de áudio poderia ser representado como um subsistema que recebe o sinal de voz (microfone), outro bloco que amplifica este sinal e outro bloco que transforma este sinal elétrico em ondas sonoras.



MODELOS

- A **análise** de um modelo permite transferir relações de interesse.
- Um bloco com linhas e setas para indicar o sentido da entrada e da saída é um modelo para um sistema.
- As relações transferidas do sistema real para o modelo são as **relações entrada/saída**.
- Podemos usar um "kit" básico para construir uma série de sistemas. Seus blocos são subsistemas ou elementos de sistemas com características próprias de entrada/saída. Por exemplo, um amplificador de áudio poderia ser representado como um subsistema que recebe o sinal de voz (microfone), outro bloco que amplifica este sinal e outro bloco que transforma este sinal elétrico em ondas sonoras.



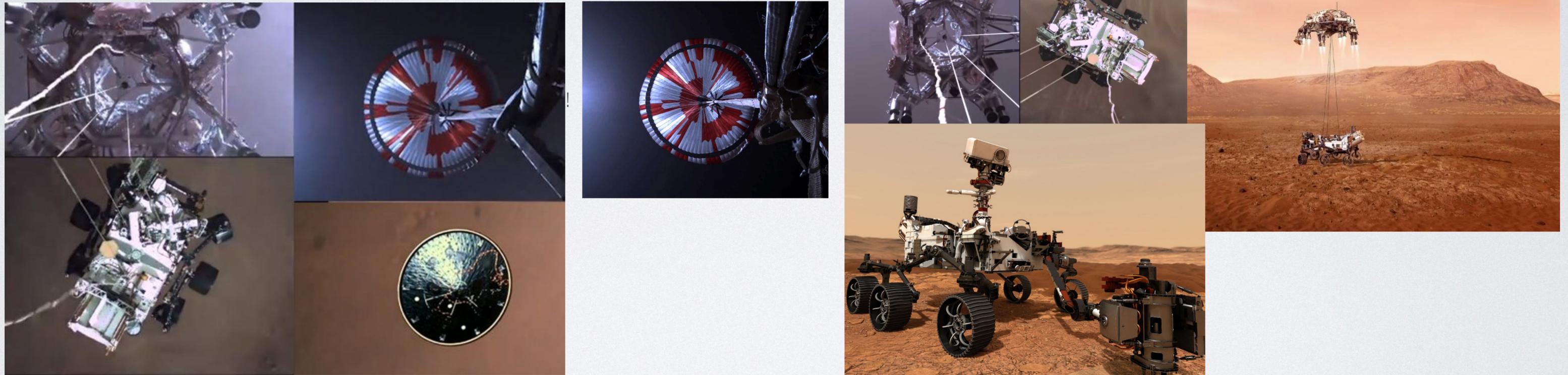
Levantando a curva de resposta de um Amplificador (INS087)
<https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/usando-os-instrumentos/2126-ins087.html> (acessado Mar/2022)

EXEMPLOS SISTEMAS MALHA ABERTA

- Exemplo_1: Suponha um **aquecedor** que só permita selecionar entre 2 elementos de aquecimento: 1 KW ou 2 KW.
- Exemplo_2: Uma **torradeira**. Entrada: pão; Saída: torrada. O grau de douramento desejado é determinado ajustando-se o dial da torradeira e não é alterado pela condição do pão. Assim, a torradeira reagirá da mesma forma tanto para um pedaço de pão fresco quanto para um pão já torrado!
- Exemplo_3: **Máquina de lavar** (simples). Entrada: roupa suja; Saída (desejada/requerida): roupas limpas. Suas chaves apenas permitem selecionar tipo de tecido, quantidade de água e duração do ciclo. A máquina não leva em conta se a roupa está mais suja ou menos suja (não altera tempo do ciclo de lavagem, de enxague ou de centrifugação — note que são todas condições pré-temporizadas fixas).
- Exemplo_4: **Chuveiro elétrico**. Entrada: água fria; Saída: temperatura adequada. O chuveiro não leva em conta a temperatura atual do ambiente ou “ ΔT ” (diferença de temperatura) necessária para se alcançar a temperatura desejada para o banho.

EXEMPLOS SISTEMAS MALHA FECHADA

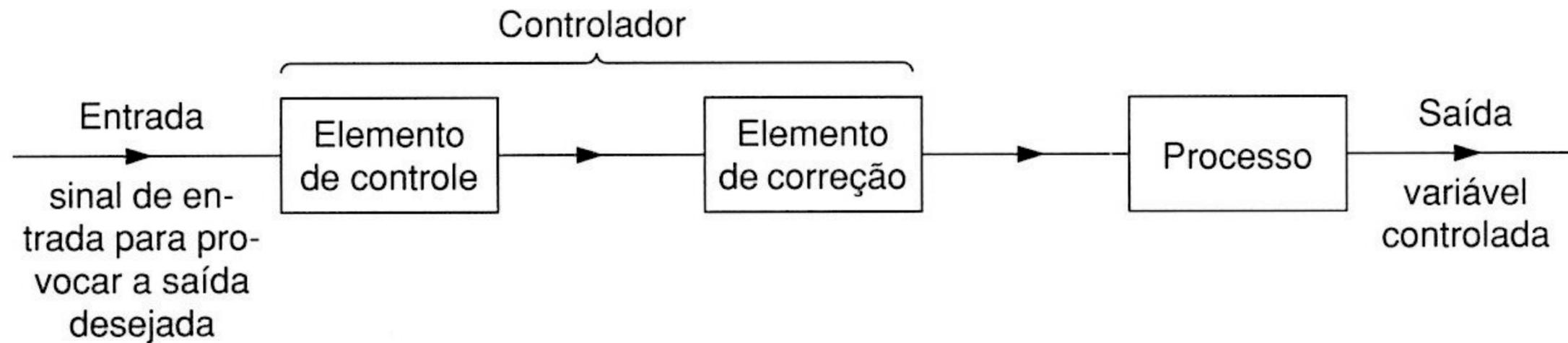
- Sistemas em “MF” são capazes de combinar valores reais com os desejados.
- Porém **sistemas MF são mais complexos**. Atrasos de tempo elevados podem comprometer uma ação corretiva e ocasionar oscilações na sua saída e comprometer a estabilidade do sistema.
Exemplo: robô Perseverance...



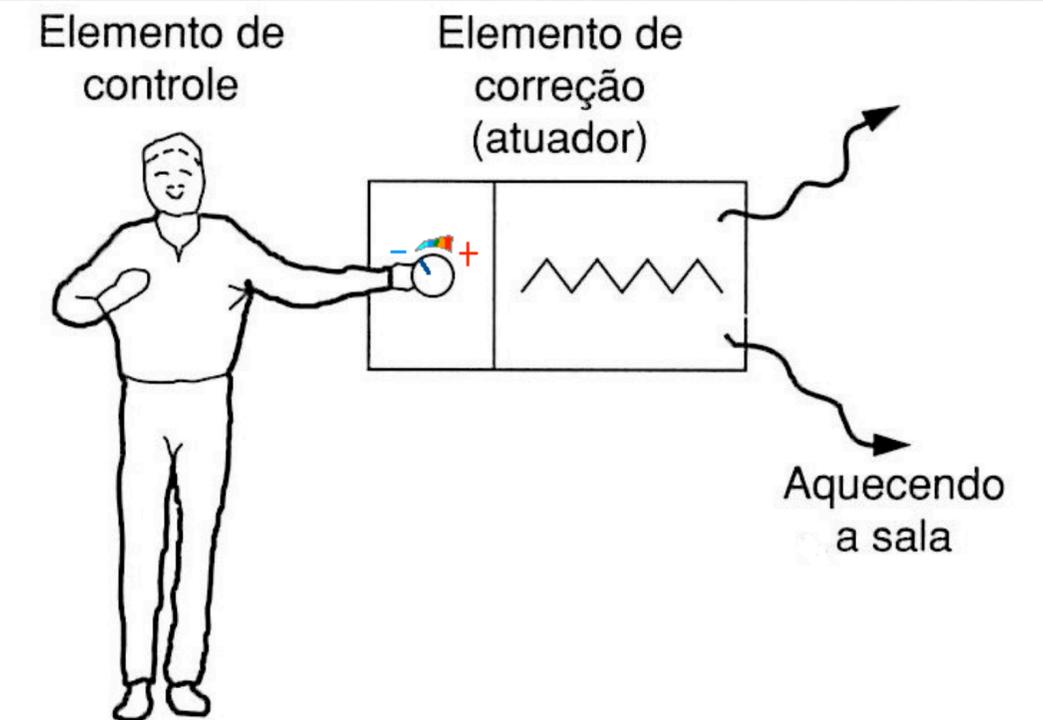
Dados: Distância Terra \Leftrightarrow Marte: 480.000.000 Km $\therefore t = \frac{d}{v} = \frac{480 \times 10^9(m)}{300 \times 10^6(m/s)} = 1.600 (s) \approx 27$ minutos! Como a distância varia entre 100 MKm e 400 MKm existe um tempo de atraso médio nas comunicações da ordem de 20 minutos.

- Sendo assim, sistemas MF são mais caros e com maiores possibilidades de danos, dada a maior quantidade de componentes.

COMPONENTES DE UM SISTEMA



- **Elemento de controle:** determina a ação que deve ser tomada.
- **Elemento de correção** (ou *atuador* ou *driver*): responde ao elemento de controle e age de forma a levar a variável controlada ao valor desejado.
- **Processo:** o processo ou planta é o sistema no qual uma variável é controlada.



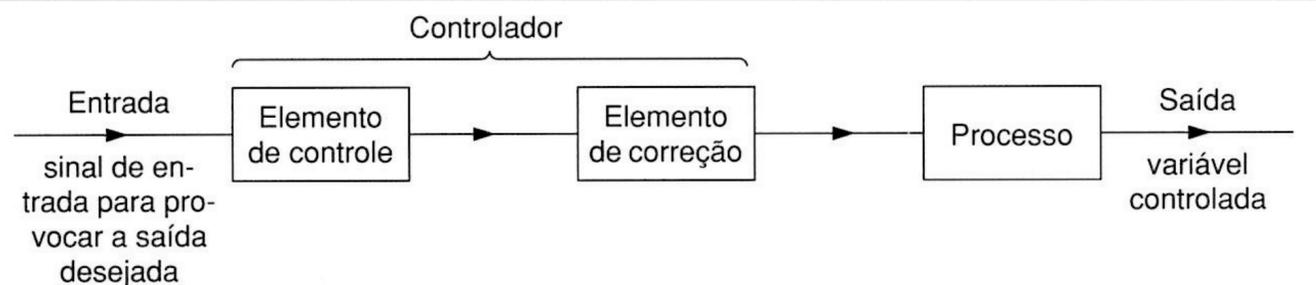
Um sistema de controle de temperatura em malha aberta.

OUTROS SISTEMAS DE MALHA ABERTA

- Muitos sistemas em MA usam um elemento de controle que envia um sinal para iniciar uma ação depois de determinado **intervalo de tempo**, ou uma sequencia de sinais para iniciar uma sequencia de ações em instantes de tempo diferentes. O controlador é simplesmente um dispositivo de chaveamento operado pelo tempo.
- Exemplo: máquinas de lavar comuns.

Sequência de máquina de lavar (exemplo):

1. Ajustar dial (controle) para tipo de tecido à ser lavado;
2. Ligar (e iniciar) contagem do tempo;
3. Completar tambor com água fria através de válvula aberta dentro de um intervalo de tempo determinado.
4. Lavar: o tambor da máquina opera por um tempo determinado;
5. Esvaziar: uma válvula opera por tempo determinado.
6. Enxague (1a-parte): completar tambor por meio de válvula aberta por tempo determinado;
7. Enxague (2a-parte): girar tambor por determinado tempo;
8. Esvaziar: uma válvula opera por um tempo determinado;
9. Centrifugar: o tambor da máquina deve girar numa velocidade maior e por determinado tempo.
10. Parar depois de decorrido certo tempo \Rightarrow Fim da lavagem.



OUTROS SISTEMAS DE MALHA ABERTA

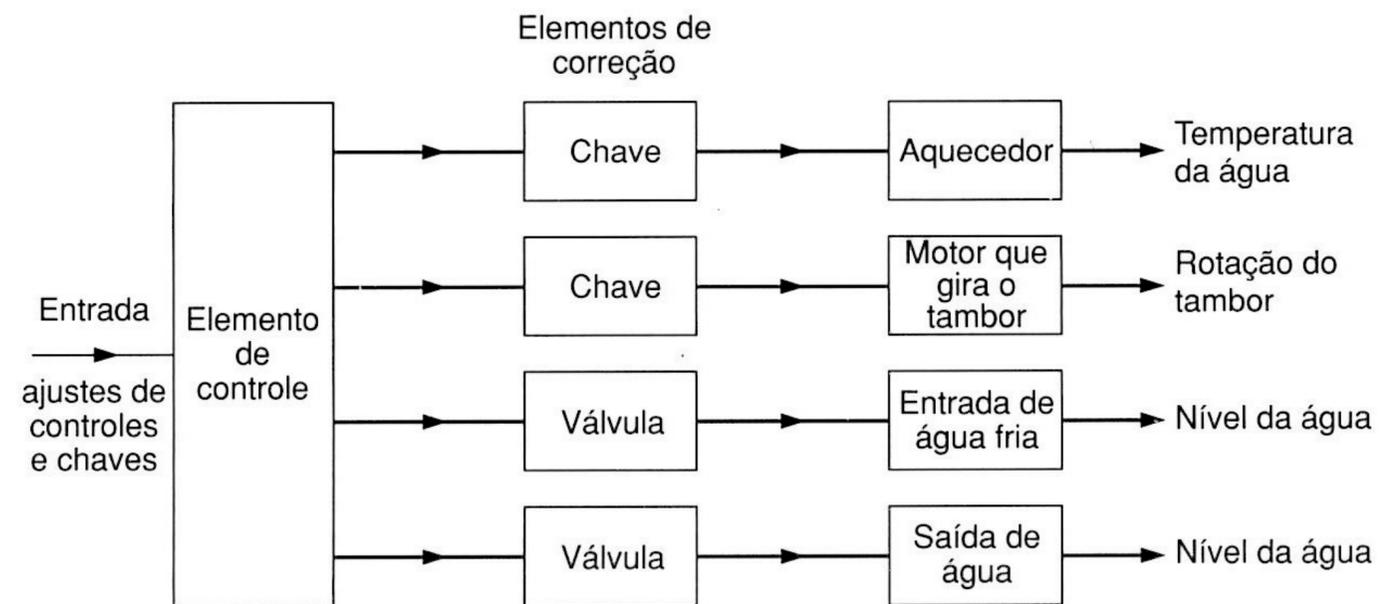
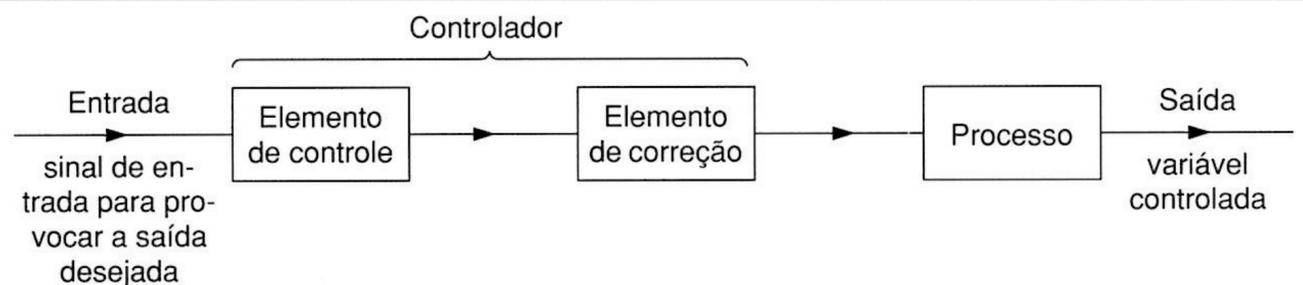


Figura 1.9 Máquina de lavar doméstica.

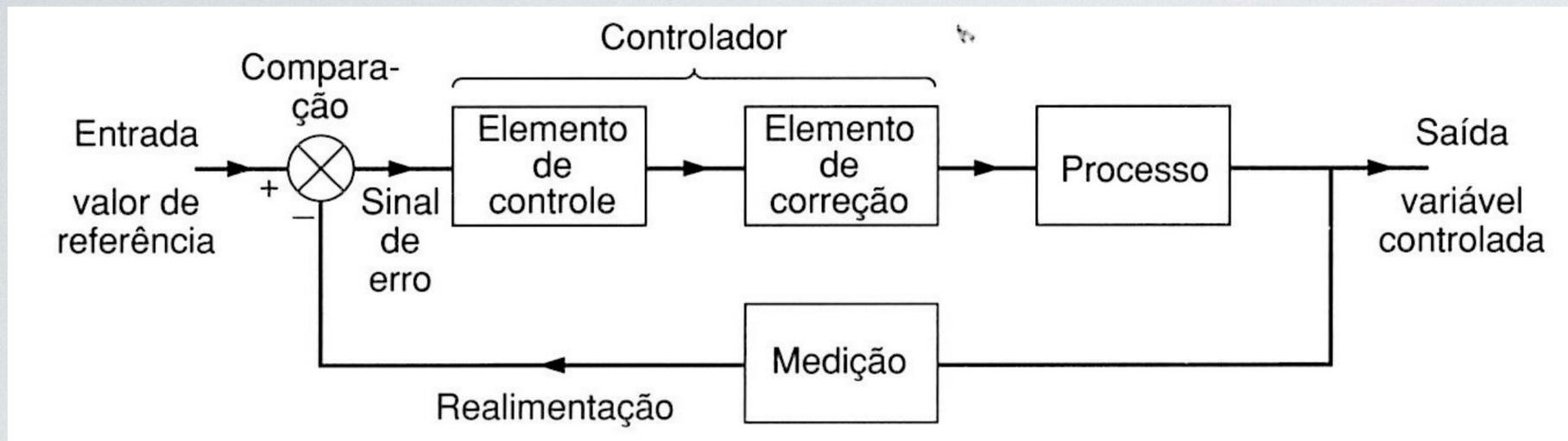
- Exemplo: máquinas de lavar comuns.



Sequência de máquina de lavar (exemplo):

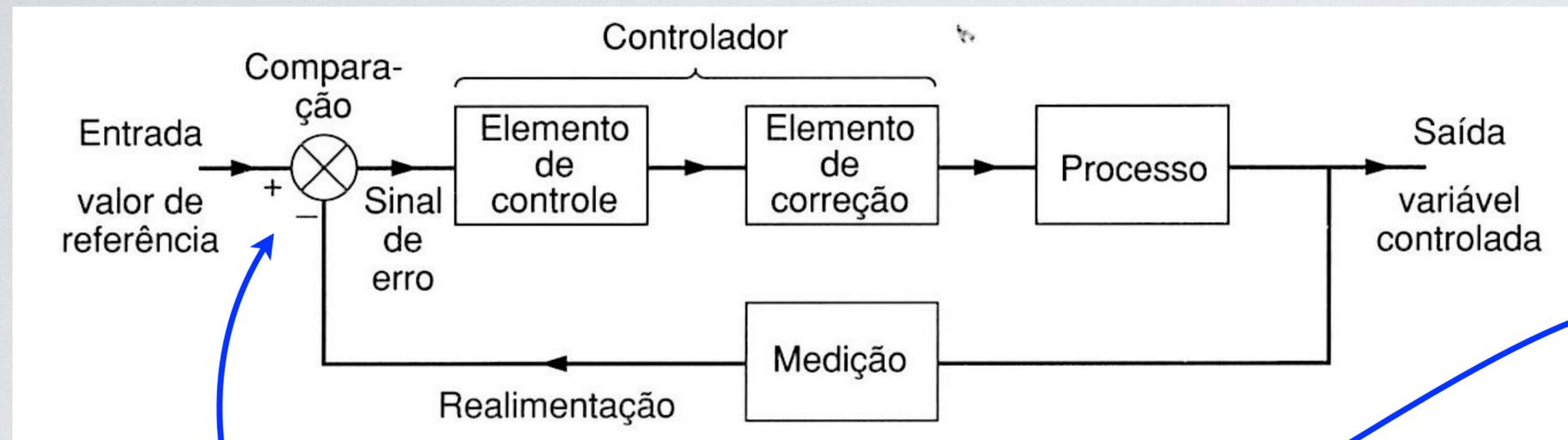
1. Ajustar dial (controle) para tipo de tecido à ser lavado;
2. Ligar (e iniciar) contagem do tempo;
3. Completar tambor com água fria através de válvula aberta dentro de um intervalo de tempo determinado.
4. Lavar: o tambor da máquina opera por um tempo determinado;
5. Esvaziar: uma válvula opera por tempo determinado.
6. Enxague (1a-parte): completar tambor por meio de válvula aberta por tempo determinado;
7. Enxague (2a-parte): girar tambor por determinado tempo;
8. Esvaziar: uma válvula opera por um tempo determinado;
9. Centrifugar: o tambor da máquina deve girar numa velocidade maior e por determinado tempo.
10. Parar depois de decorrido certo tempo \Rightarrow Fim da lavagem.

ELEMENTOS SISTEMA EM MALHA FECHADA



- **Elemento de Comparação:** compara valor desejado com valor medido e determina sinal de erro que quantifica quanto o valor da saída está desviado do valor desejado.
 $Sinal_Erro = Valor_Referência - Sinal_Medido$
- **Elemento de controle:** decide que ação tomar quando recebe sinal de erro.
- **Elemento atuador** (ou **de correção**): usado para atuar sobre o processo (modifica saída do processo, modificando sua entrada).
- **Processo:** planta ou sistema no qual uma variável está sendo controlada.
- **Elemento de medida** (**Sensor**): gera um sinal relacionado com a variável que está sendo controlada e completa a realimentação para o elemento de comparação.

ELEMENTOS SISTEMA EM MALHA FECHADA



- **Realimentação**

Negativa:

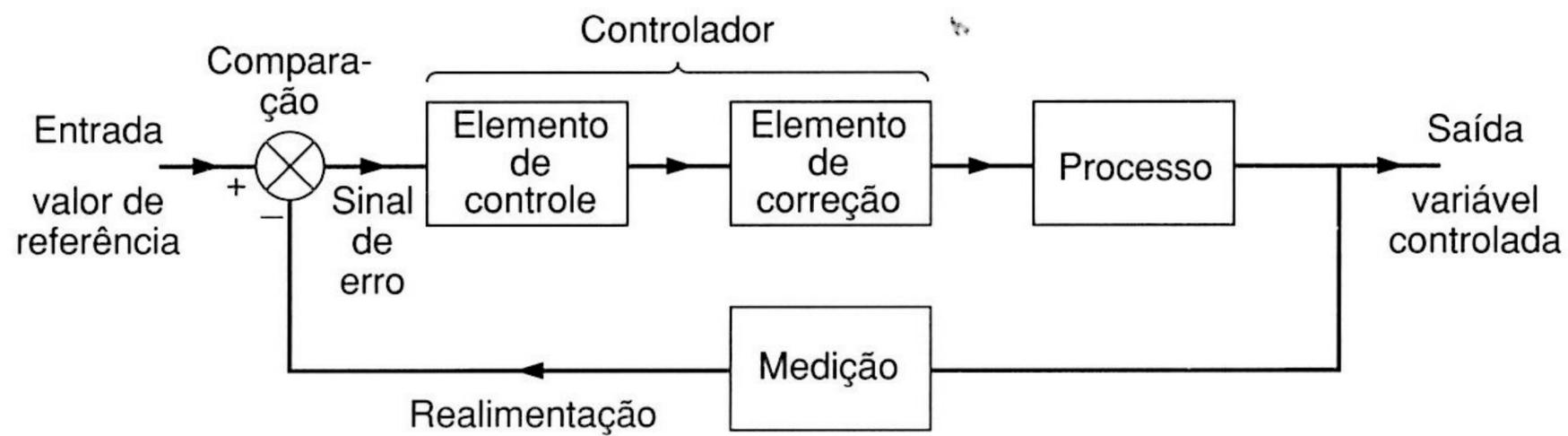
$$Erro = Refer\hat{e}ncia - Sa\acute{ida}$$

Também existe:

- **Realimentação Positiva:**

$$Erro = Refer\hat{e}ncia + Sa\acute{ida}$$

ELEMENTOS SISTEMA EM MALHA FECHADA



- **Exemplo:**

Obs.: Neste caso, o elemento controlador é o ser humano.

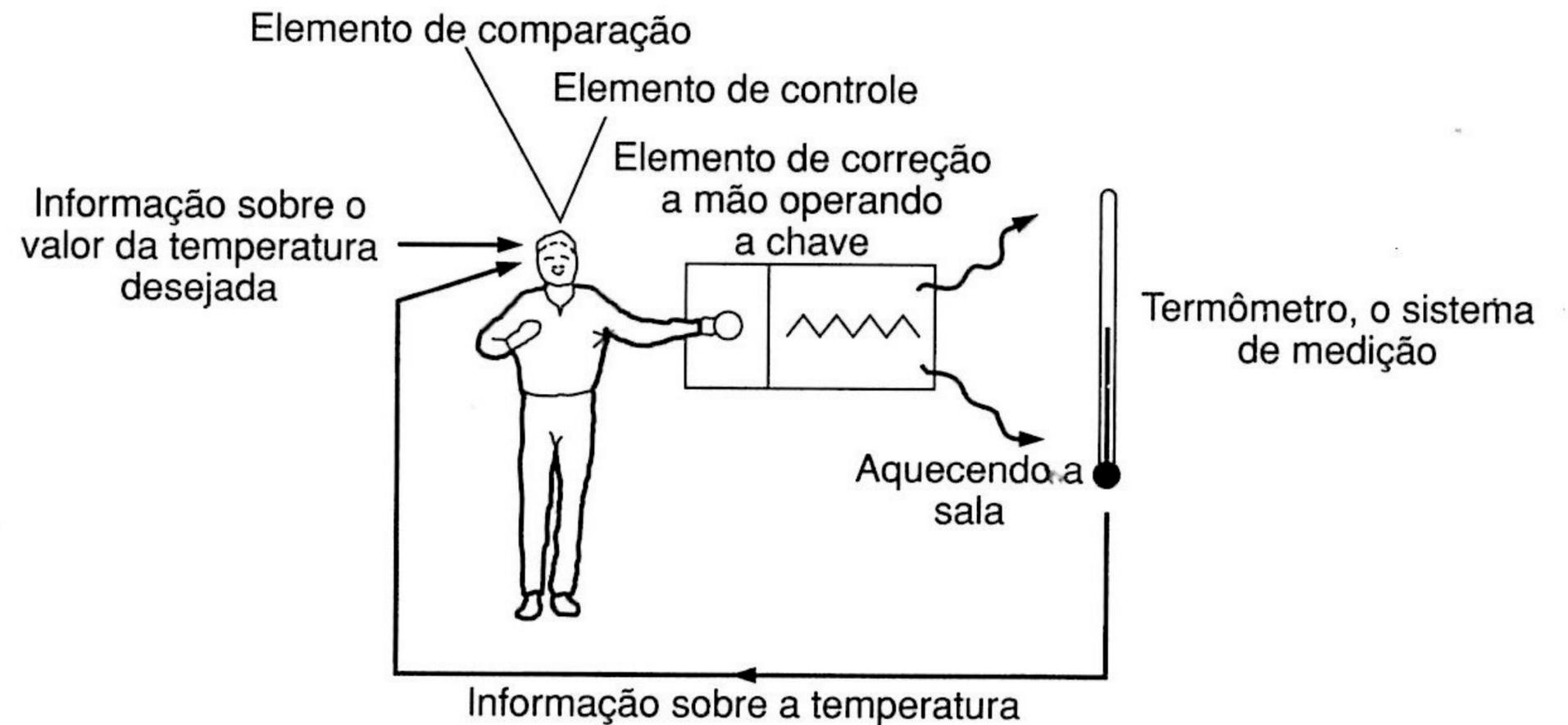
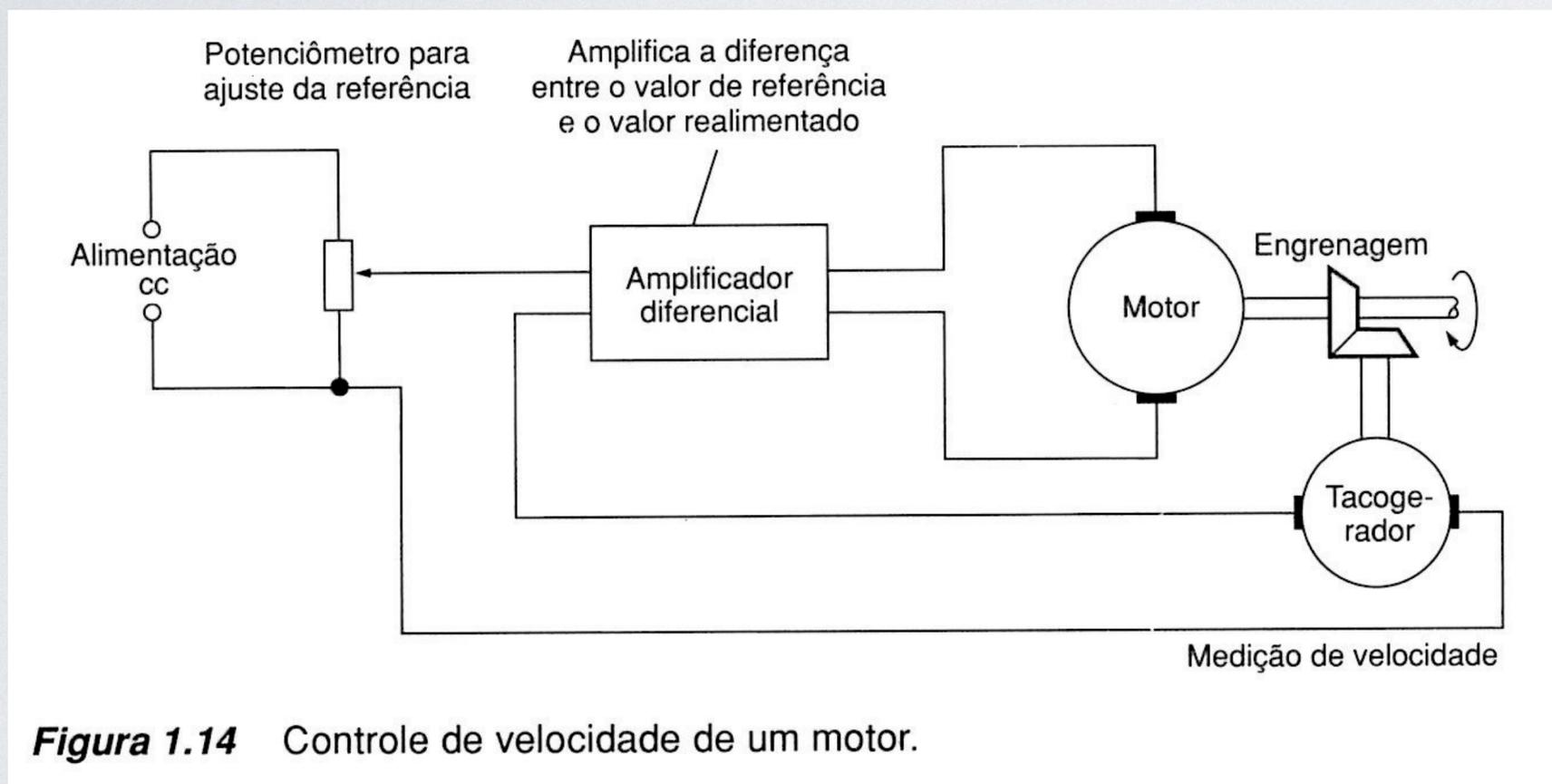


Figura 1.11 Um sistema de controle de temperatura em uma sala em malha fechada.

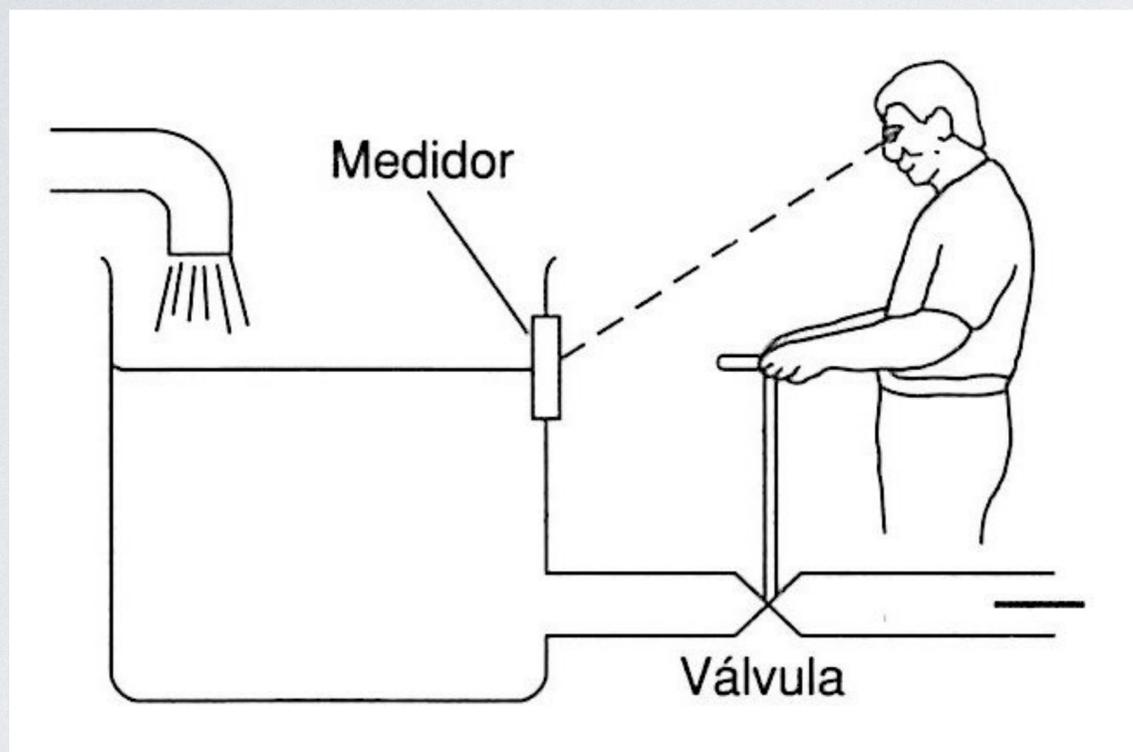
EXEMPLOS MALHA FECHADA

- Controle de velocidade de um motor:



EXEMPLOS MALHA FECHADA

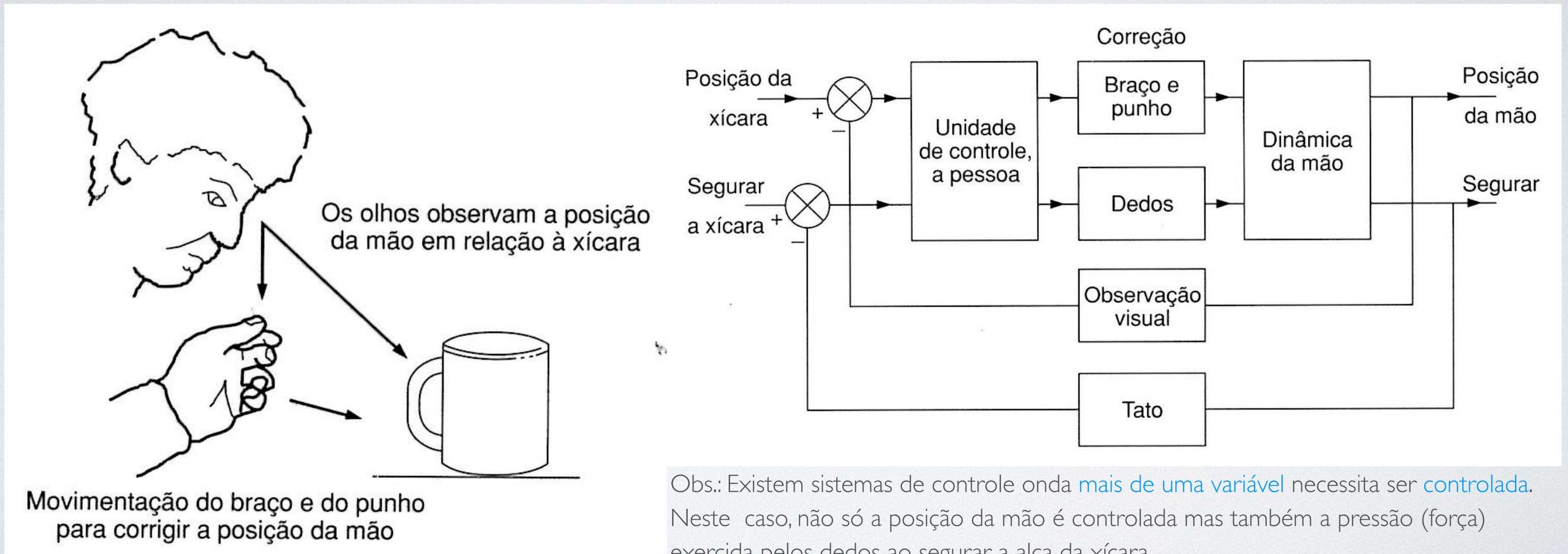
- Controle de nível de líquido:



- Variável controlada: nível do líquido no tanque;
- Valor de referência: nível desejado indicado por marca no recipiente;
- Elemento de comparação: ser humano;
- Sinal de erro: diferença entre nível e nível real;
- Elemento de controle: ser humano;
- Elemento de correção (atuador): válvula;
- Processo: água no recipiente;
- Sensor: observação visual de uma escala.

EXEMPLOS MALHA FECHADA

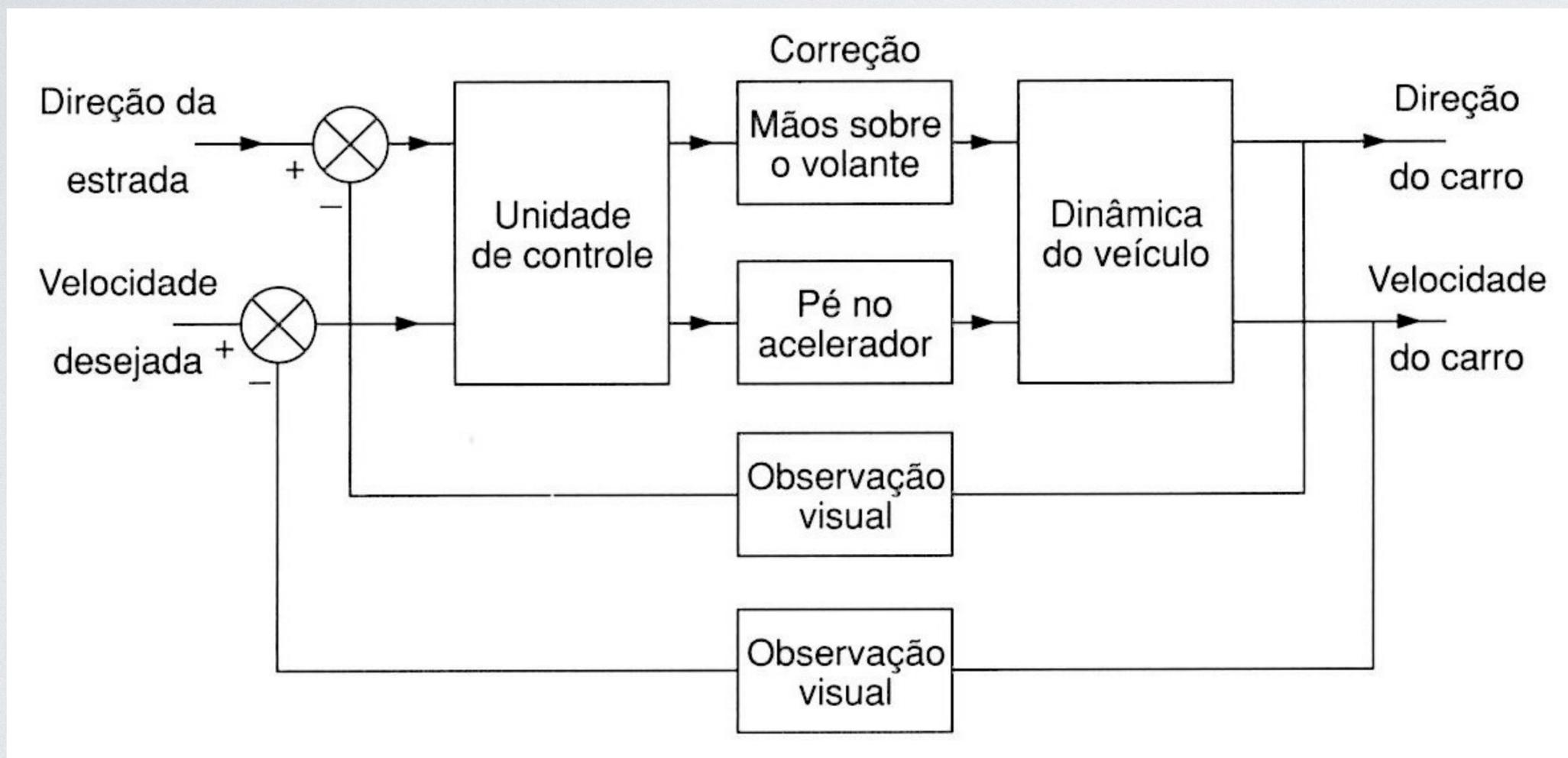
- Movimento para pegar uma xícara de café:



Obs.: Existem sistemas de controle onde **mais de uma variável** necessita ser **controlada**. Neste caso, não só a posição da mão é controlada mas também a pressão (força) exercida pelos dedos ao segurar a alça da xícara. Existem assim 2 **ramos de realimentação**: um para posição e outro para a pressão (força).

EXEMPLOS MALHA FECHADA

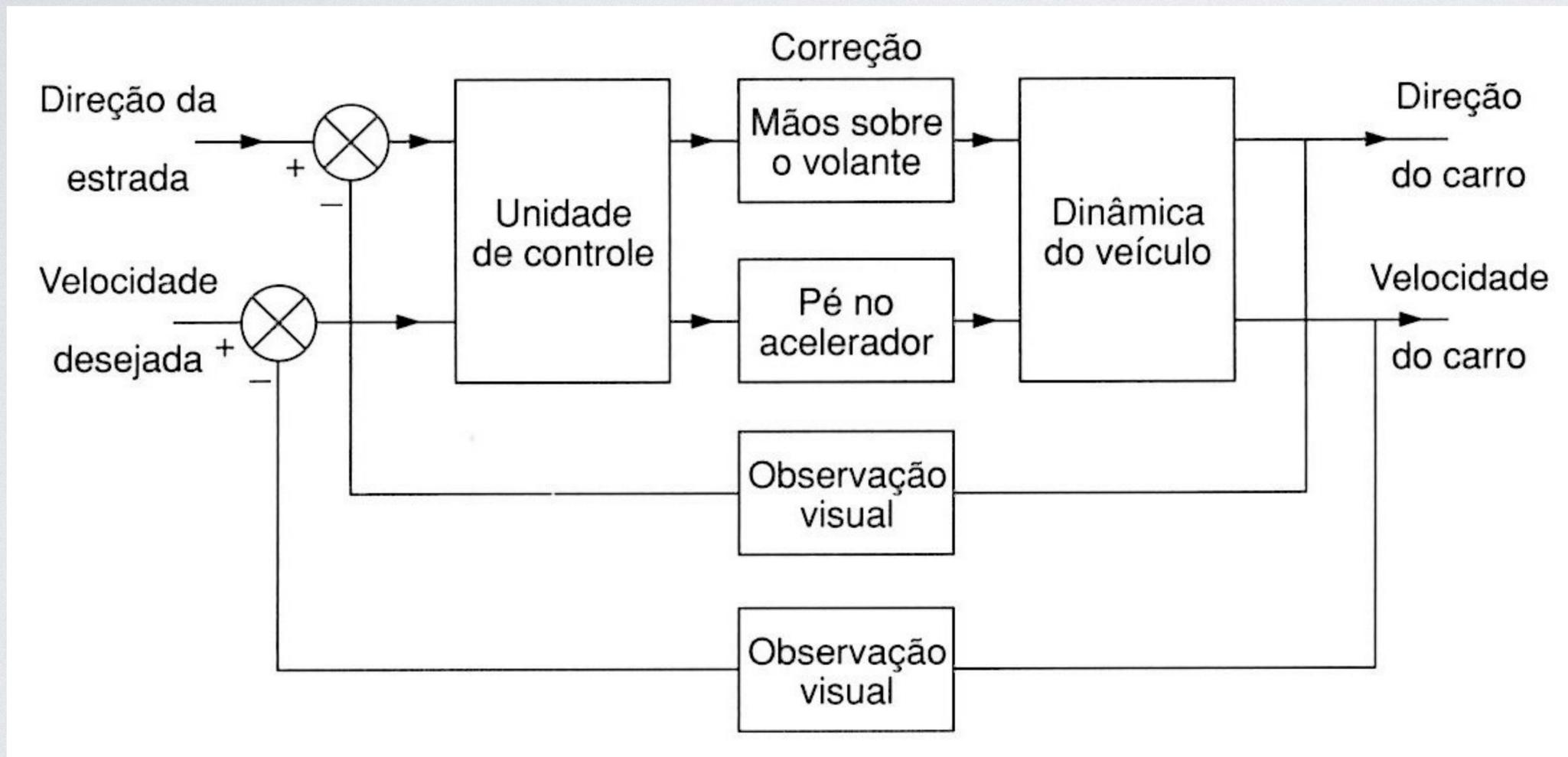
- Dirigir um carro:



- Variável Controlada I: direção ao longo da estrada;
- Valor de Referência I: direção desejada;
- Elemento Comparação I: ser humano;
- Sinal de Erro I: diferença entre direção real x direção desejada;
- Elemento de Controle I: ser humano;
- Elemento de correção I: mãos no volante;
- Processo I: dinâmica do veículo;
- Sensor I: observação visual
- Realimentação negativa

EXEMPLOS MALHA FECHADA

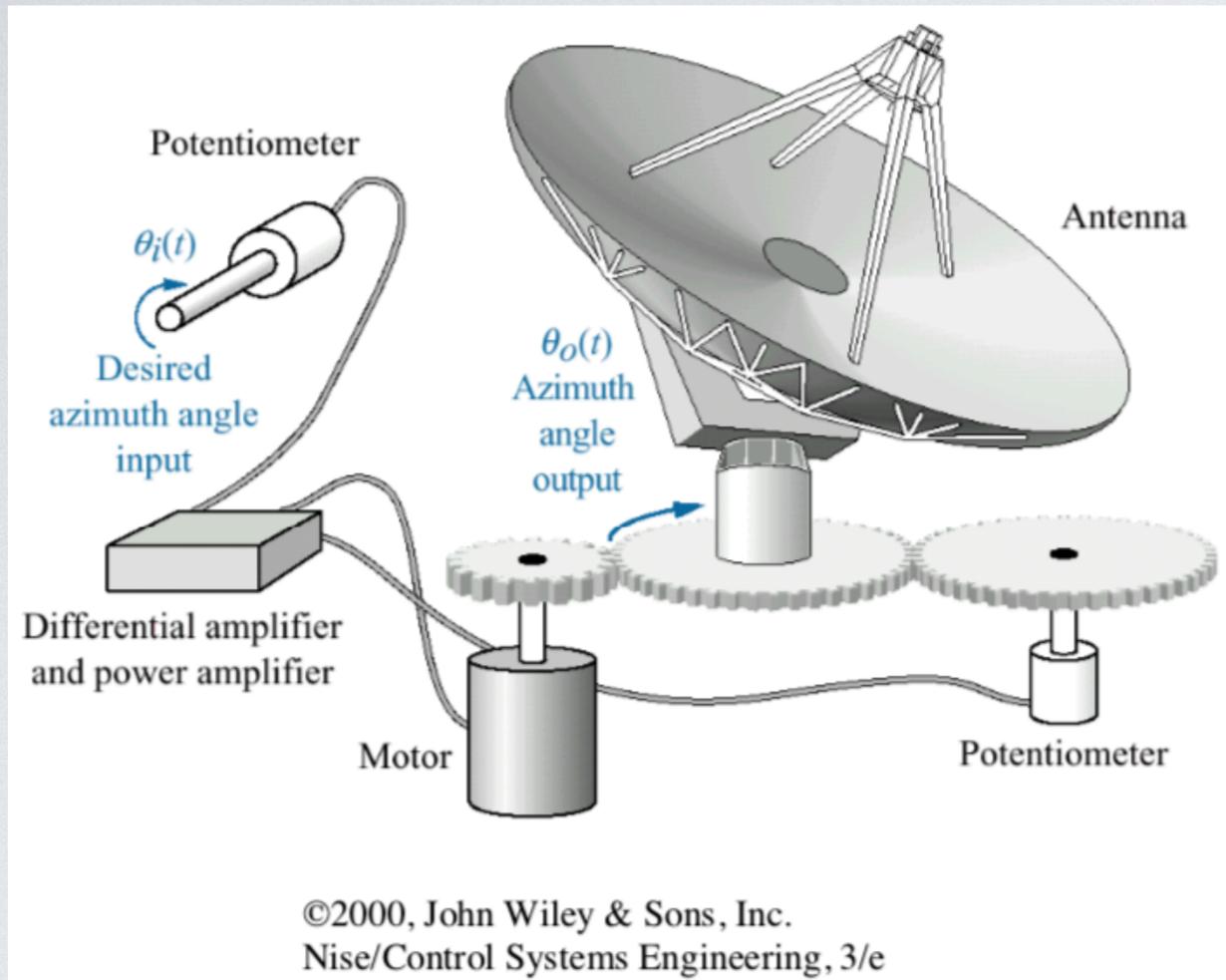
- Dirigir um carro:



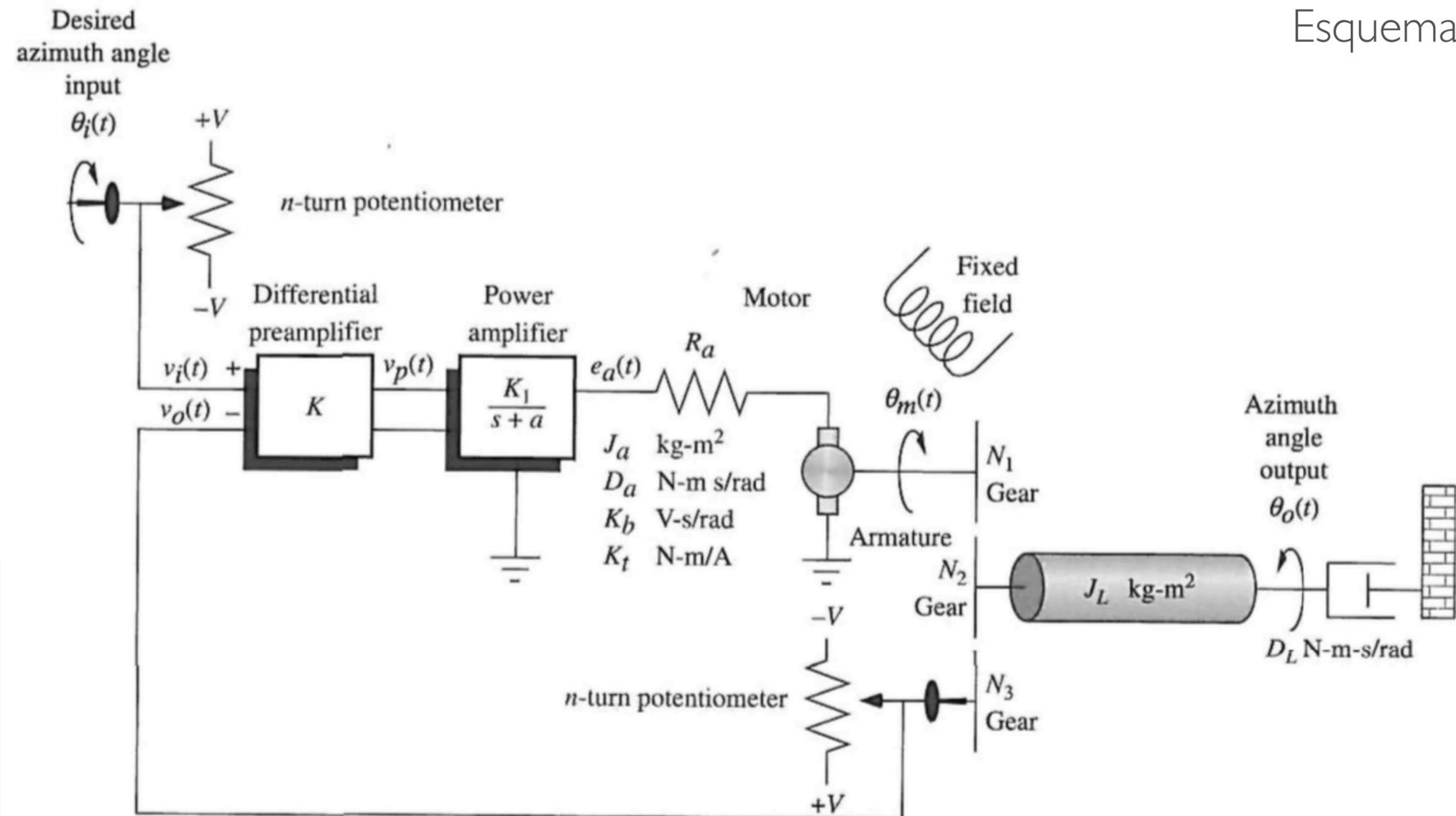
- Variável Controlada 2: velocidade do carro ao longo da estrada;
- Valor de Referência 2: velocidade desejada;
- Elemento Comparação 2: ser humano;
- Sinal de Erro 2: diferença entre velocidade real x desejada;
- Elemento de Controle 2: ser humano;
- Elemento de correção 2: pedais do acelerador e freio;
- Processo 2: dinâmica do veículo;
- Sensor 2: observação visual
- Realimentação negativa

EXEMPLOS MALHA FECHADA

- Sistema de controle de azimute de uma antena:

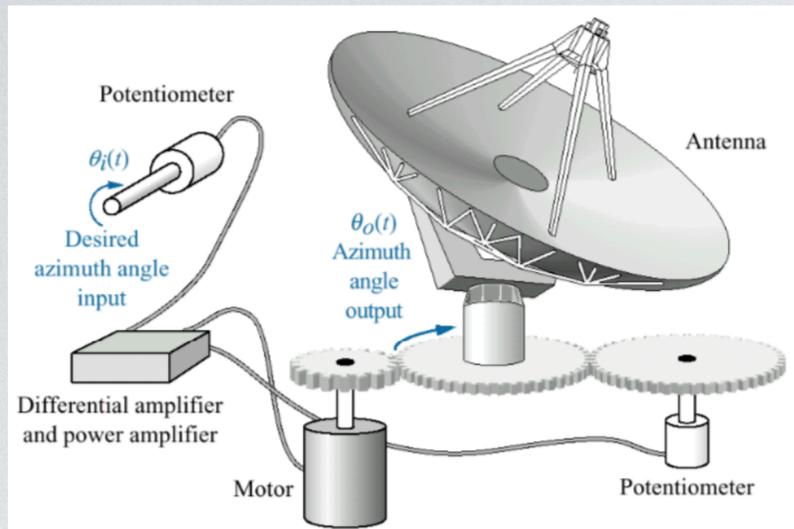


Layout.



EXEMPLOS MALHA FECHADA

- Sistema de controle de azimute de uma antena:



©2000, John Wiley & Sons, Inc.
Nise/Control Systems Engineering, 3/e

Layout.

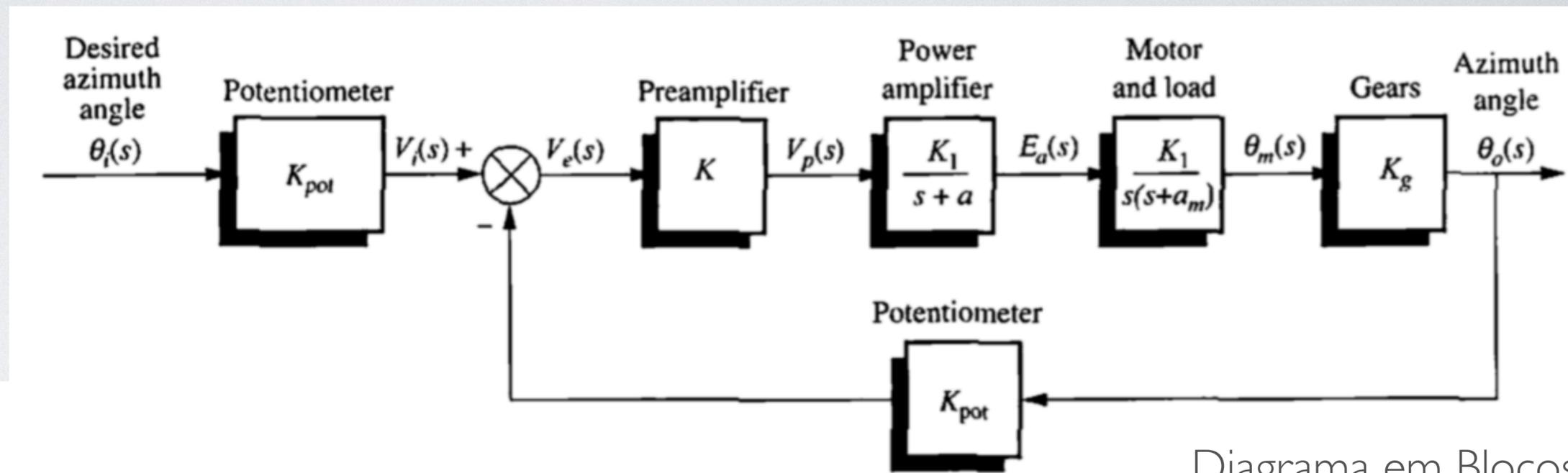
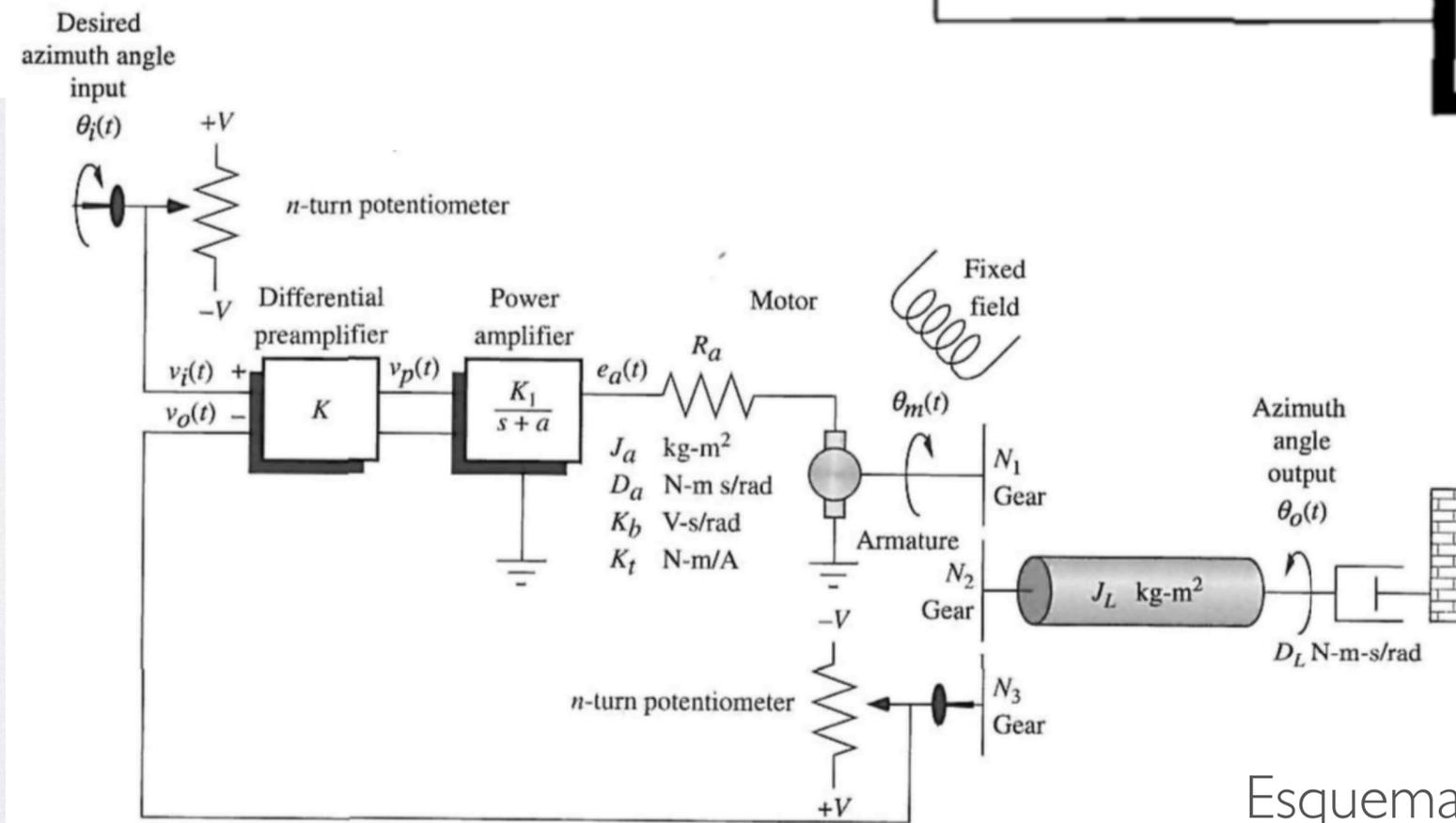


Diagrama em Blocos.



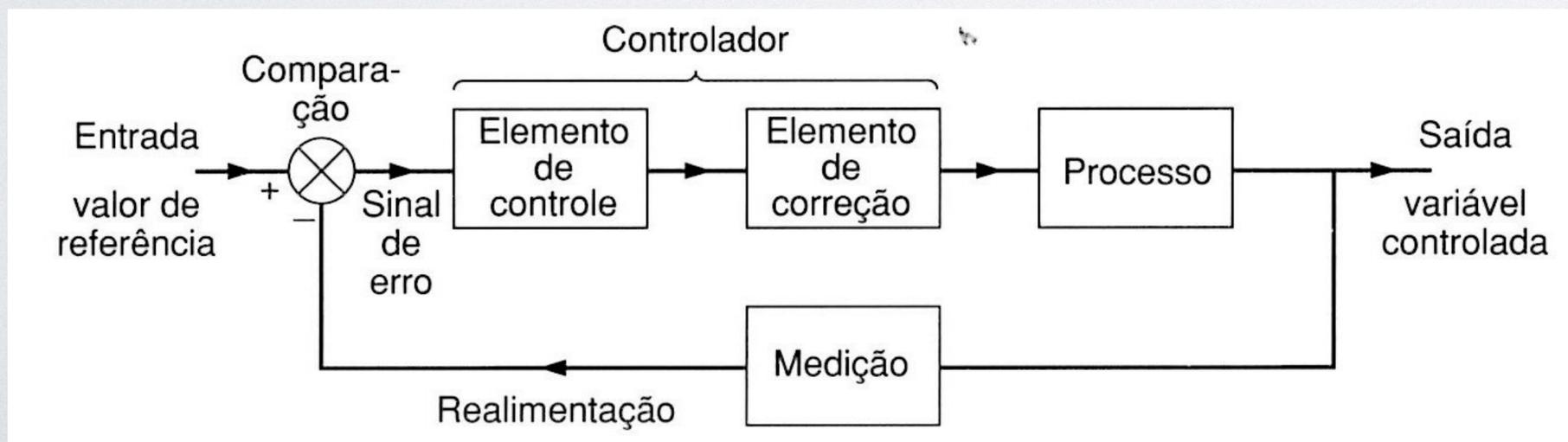
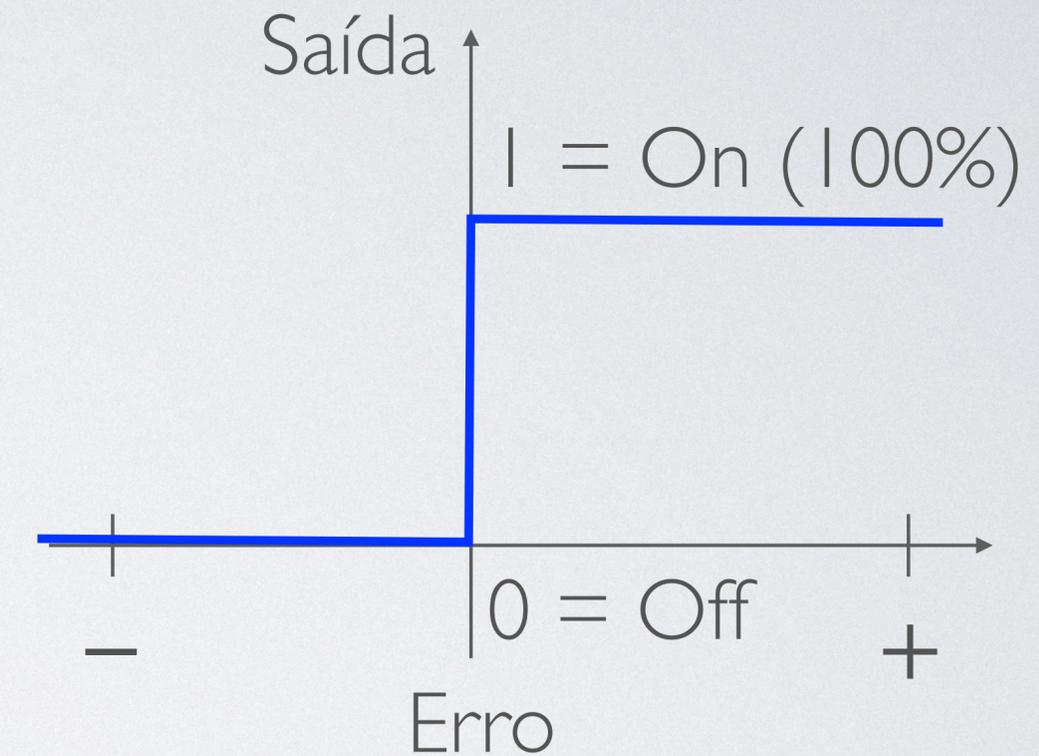
Esquema.

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

- **Controle on/off:**

- Exemplos:

- Aquecedor doméstico (controlador por elemento bimetálico):
- “Chave bóia” de tanques de água residenciais.



ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

- **Controle Proporcional:**

- Exemplos:

- AC "Inverter":

- Controle de nível de líquido com válvula elétrica proporcional..

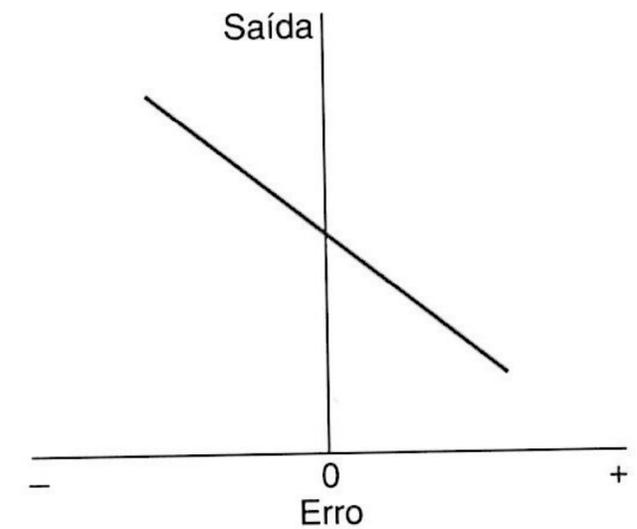


Figura 1.20 Controle proporcional.

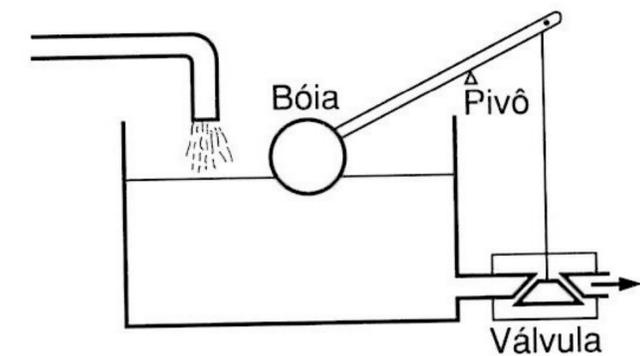
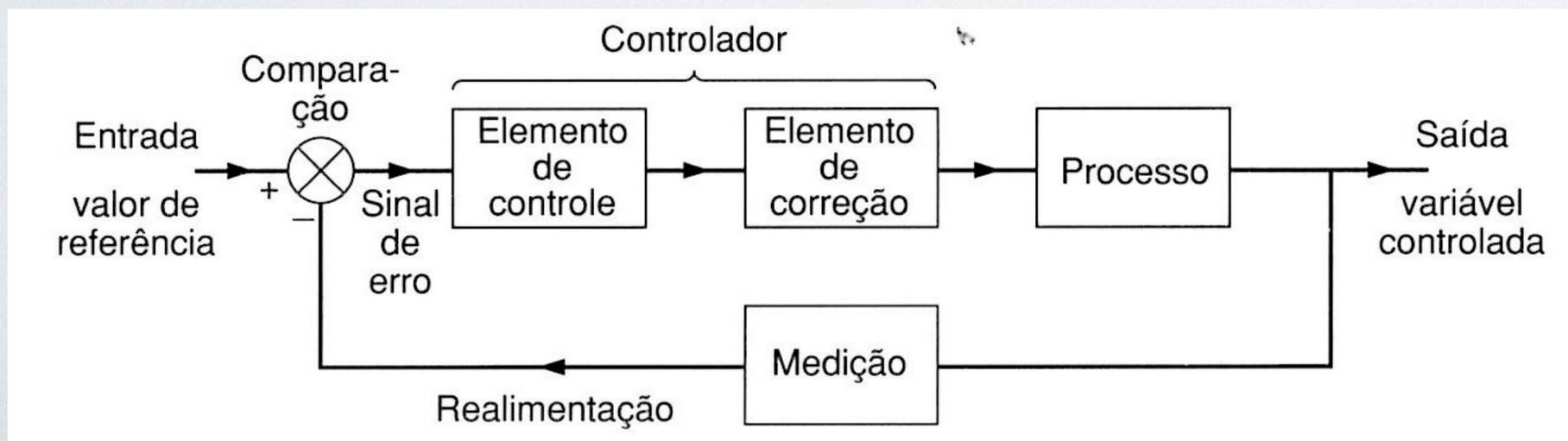
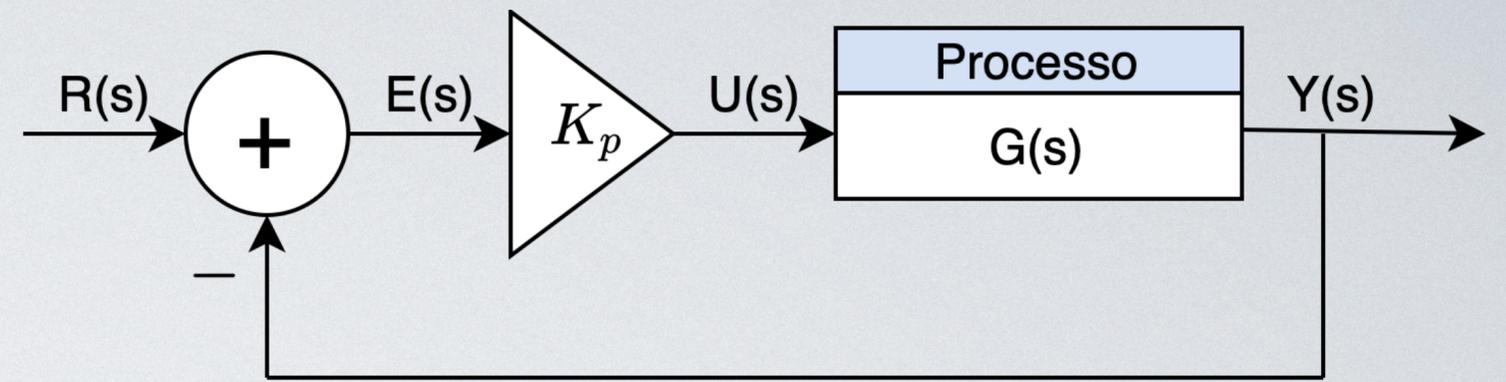


Figura 1.21 Sistema de controle de nível proporcional.

DETALHES MALHA-FECHADA

- A realimentação normalmente é negativa para que a ação corretiva tomada pelo controlador possa levar a variável controlada ao valor desejado.



Considere: - Referência (valor desejado), $r(t) = 50$ Km/h e $K_p = 1/2$;

Caso 1) Veículo acima da velocidade desejada. Medido, $y(t) = 60$ Km/h.

- Como é realizada a "correção" ou controle?

Cálculo do Erro:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

$$e(t) = 50 - 60$$

$$e(t) = -10$$

Cálculo Ação de Controle:

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

$$u(t) = 0,5 \cdot (-10)$$

$$u(t) = -5$$

○ sinal negativo significa "tirar" energia do sistema.

○ valor significa quanto deve ser retirado neste caso (**subir** pedal do acelerador em $+5^\circ$).

Caso 2) Veículo abaixo da velocidade desejada. Medido, $y(t) = 40$ Km/h.

- Como é realizada a "correção" ou controle?

Cálculo do Erro:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

$$e(t) = 50 - 40$$

$$e(t) = +10$$

Cálculo Ação de Controle:

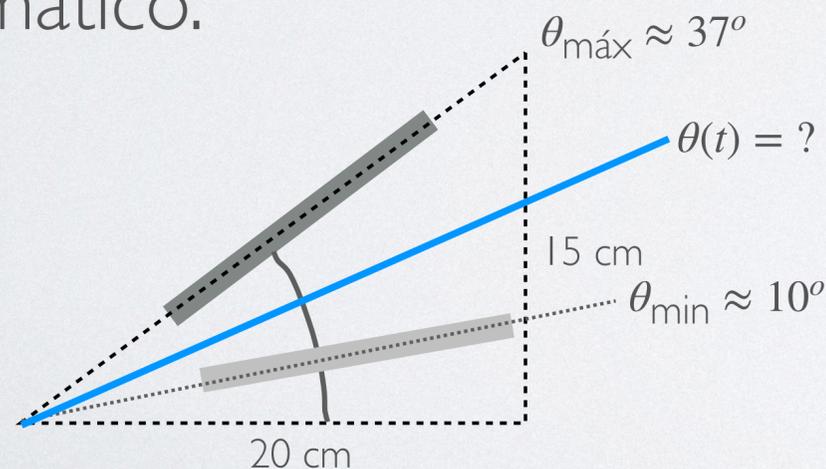
$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

$$u(t) = 0,5 \cdot (10)$$

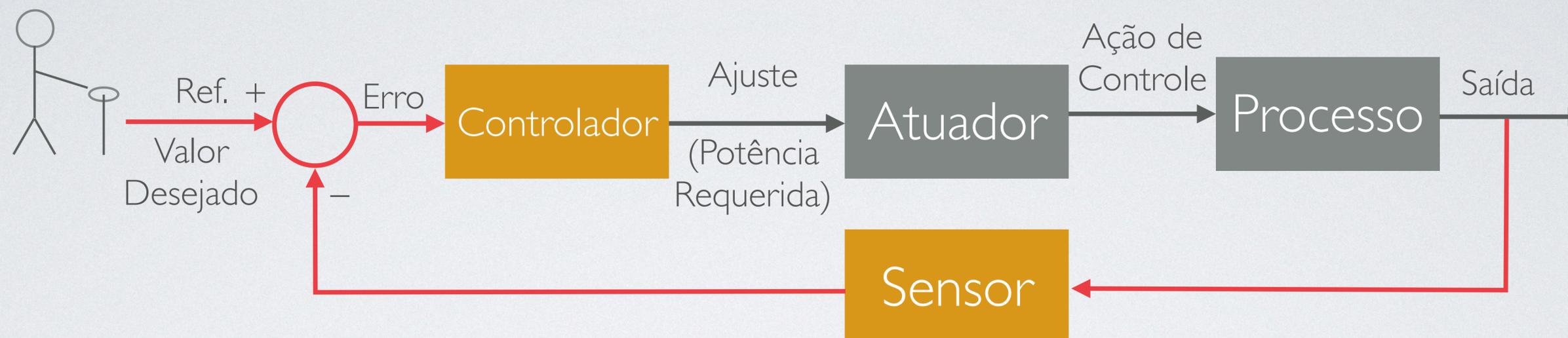
$$u(t) = +5$$

○ sinal positivo significa "ingressar" mais energia no sistema. ○ valor significa quanto deve ser retirado neste caso (**descer** pedal do acelerador em -5°).

Exemplo: Controle de velocidade (Proporcional) de um piloto automático.



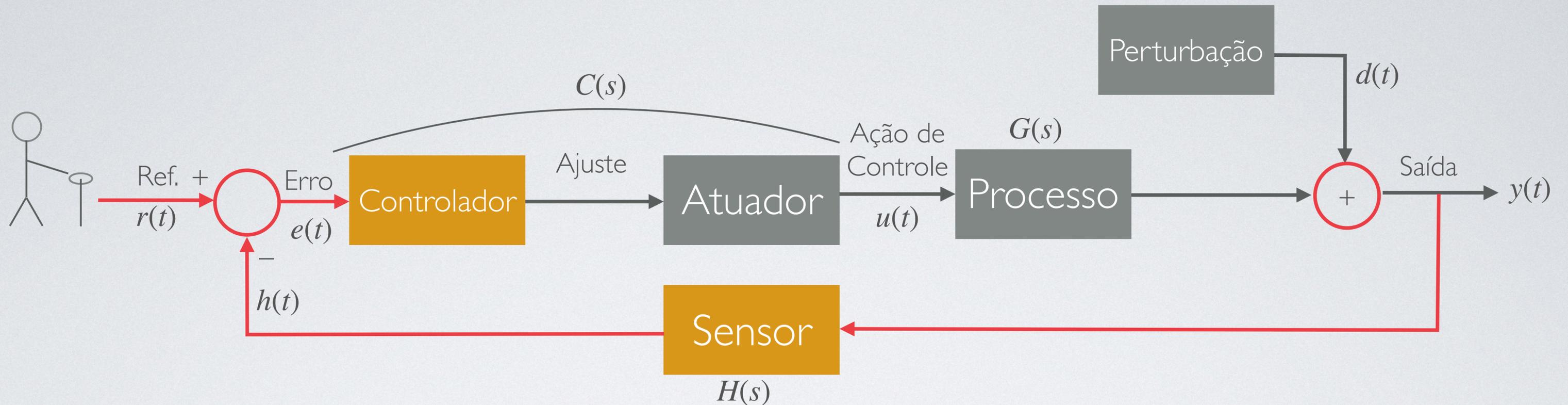
VANTAGENS MALHA-FECHADA



- Redução da sensibilidade do sistema frente à variações da planta (efeitos de “carregamento”);
- Rejeição à perturbações;
- Melhoria na resposta transitória (reduz ou anula erro; reduz tempo de assentamento (tempo de resposta));
- Estabiliza sistemas que antes eram instáveis em malha-aberta.

Por exemplo: Segways, Controle altitude de aeronaves (UAVs), processo de pêndulo invertido.

EQUACIONANDO MALHA-FECHADA:



$$Y(s) = E(s) \cdot C(s) \cdot G(s) \quad \text{☞ Sistema ainda sem perturbação, } D(s)$$

$$E(s) = R(s) - H(s)$$

Supondo: $H(s) = 1$ (realimentação unitária), teremos:

$$E(s) = R(s) - Y(s)$$

$$Y(s) = (R(s) - Y(s)) \cdot C(s) \cdot G(s)$$

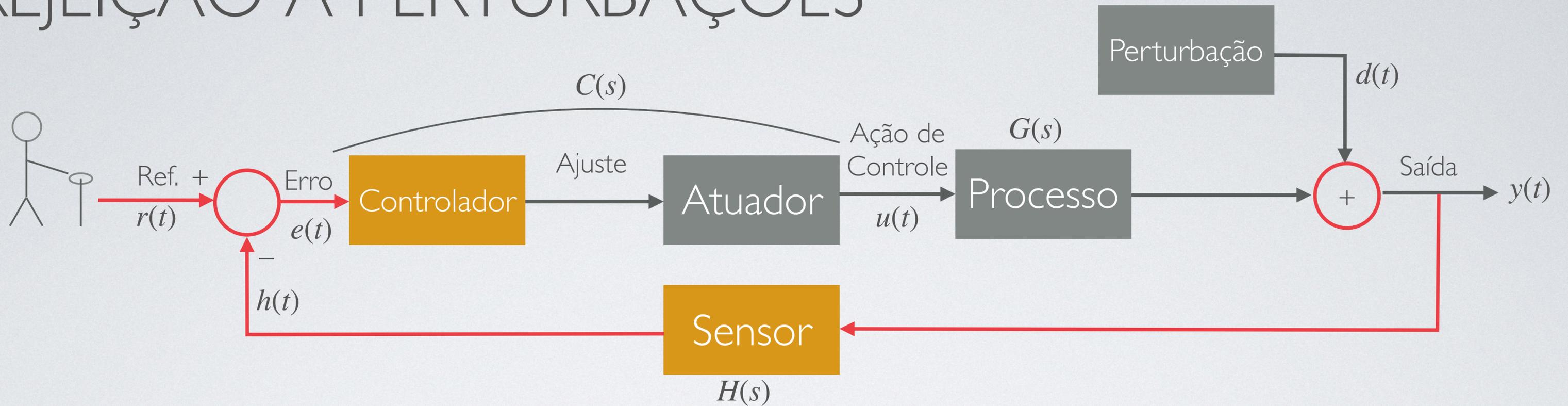
Colocando $Y(s)$ em evidência, teremos:

$$Y(s)[1 + C(s)G(s)] = R(s) \cdot C(s) \cdot G(s)$$

$$Y(s) = R(s) \cdot \left[\frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \right]$$

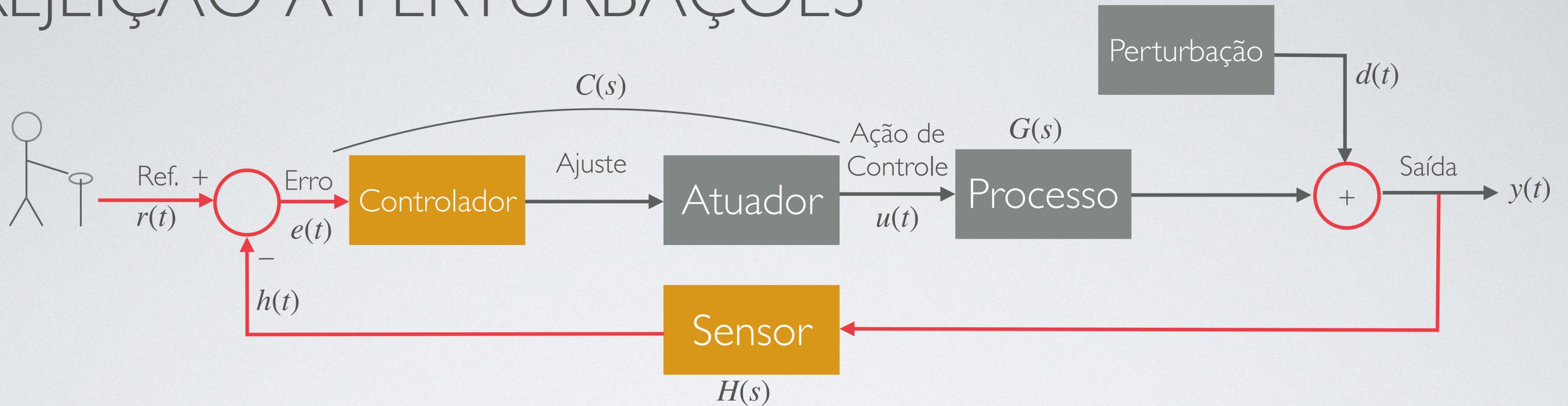
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad \text{☞ Relação saída/entrada do sistema (função transferência de MF)}$$

REJEIÇÃO À PERTURBAÇÕES



- Note: não há como medir (prever) perturbações num sistema;
- Como então a realimentação assegura uma rejeição contra perturbações externas?

REJEIÇÃO À PERTURBAÇÕES



• Equacionando:

$$y = C G e + d$$

$$e = r - h$$

$$h = H y$$

$$e = r - H y$$

$$y = C G (r - H y) + d$$

$$y = C G r - C G H y + d$$

$$y(1 + C G H) = C G r + d$$

$$y = r \left(\frac{C G}{1 + C G H} \right) + d \left(\frac{1}{1 + C G H} \right)$$

↑
↑

Referência (Set-point)
Perturbação

FTMF
Rejeição

Saída do Sistema

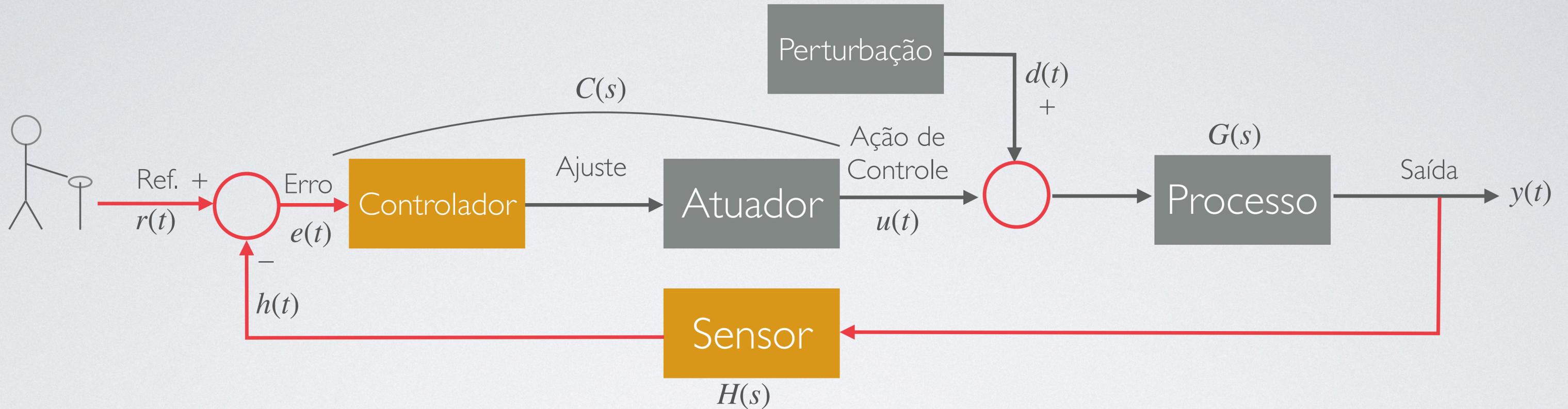
Então:

Note que a perturbação, d é atenuada (rejeitada) numa malha fechada por um fator:

$$\left(\frac{1}{1 + C G H} \right)$$

REJEIÇÃO À PERTURBAÇÕES

Se a perturbação ocorresse entre 2 elementos do ramo direto (entre saída do controle e entrada do processo):



• Equacionando:

$$y = G [C (r - H y) + d]$$

$$y (1 + C G H) = C G r + G d$$

$$y = r \left(\frac{C G}{1 + C G H} \right) + d \left(\frac{G}{1 + C G H} \right)$$

↑
↑

Referência (Set-point)
Perturbação

FTMF
Rejeição

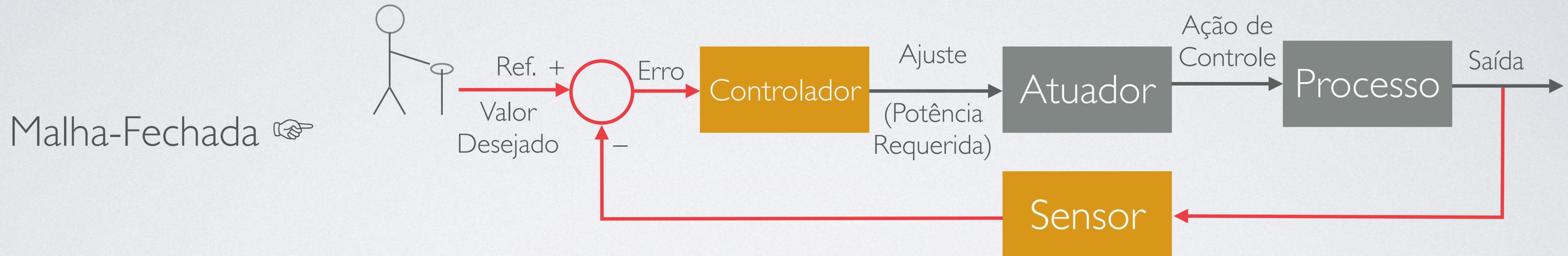
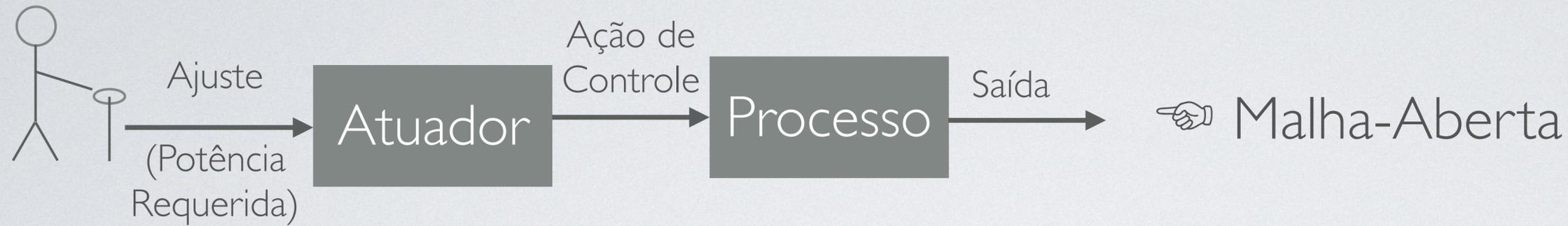
Saída do Sistema

Então:

Note que a perturbação, d continua sendo atenuada (rejeitada) numa malha fechada por um fator do tipo:

$$\left(\frac{1}{1 + C G H} \right)$$

DESVANTAGENS MALHA-FECHADA



- Mais caro (🏠 \$\$\$) de implementar: exige investir em sensor, controlador e atuador
- Mais complexo: exige "sintonia" do controlador (valor do K_p por exemplo).
- Exige testes práticos, algum método de sintonia ou modelagem matemática do sistema (para correta definição do controlador).
- O controle por realimentação não provê controle preditivo para compensar os efeitos de perturbações conhecidas ou mensuráveis;
- Se grandes perturbações forem frequentes, o processo pode operar continuamente em estado transitório e nunca atingir o estado estacionário desejado;
- Em certas aplicações a variável controlada pode não ser diretamente mensurável (teria de ser estimada) e conseqüentemente, o controle por realimentação não seria viável.

REF. BIB.:

- Bolton, W., **Engenharia de Controle**, São Paulo: Makron Books, 1995.
- Garcia, C., **Controle de Processos Industriais, Volume I: estratégias convencionais**, São Paulo: Blucher, 2017.
- Nise, Norman S., **Engenharia de Sistemas de Controle**, Rio de Janeiro: LTC, 8a-ed., 2023.