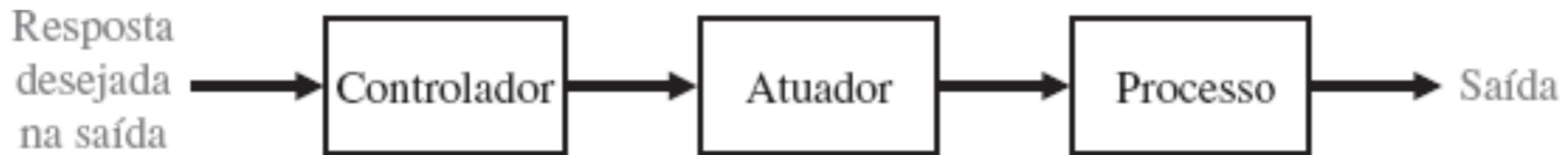

Ações de Controle Básicas

Prof. Fernando Passold

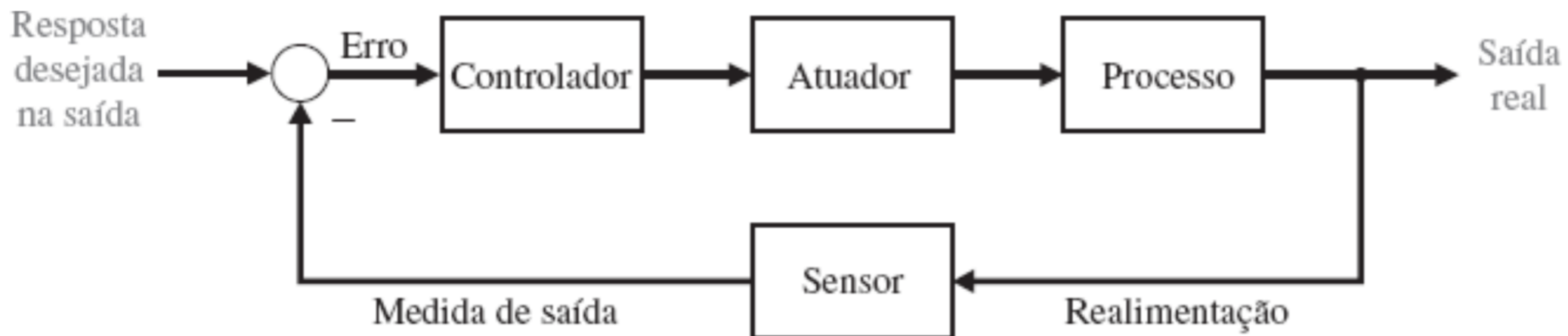
Malhas de controle



Malha aberta (sem nenhum controle ou realimentação):

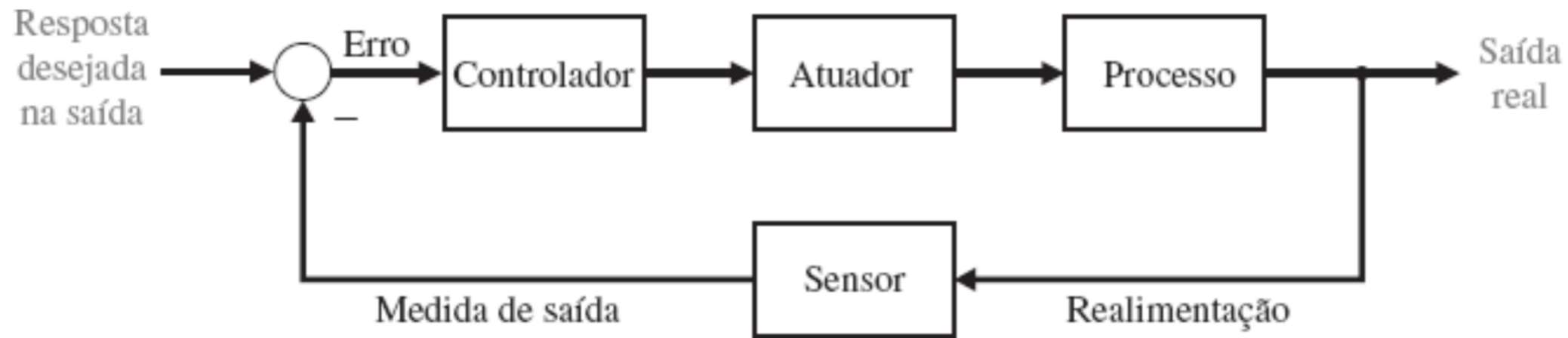


Malha fechando (acrescentando controle ou realimentação):

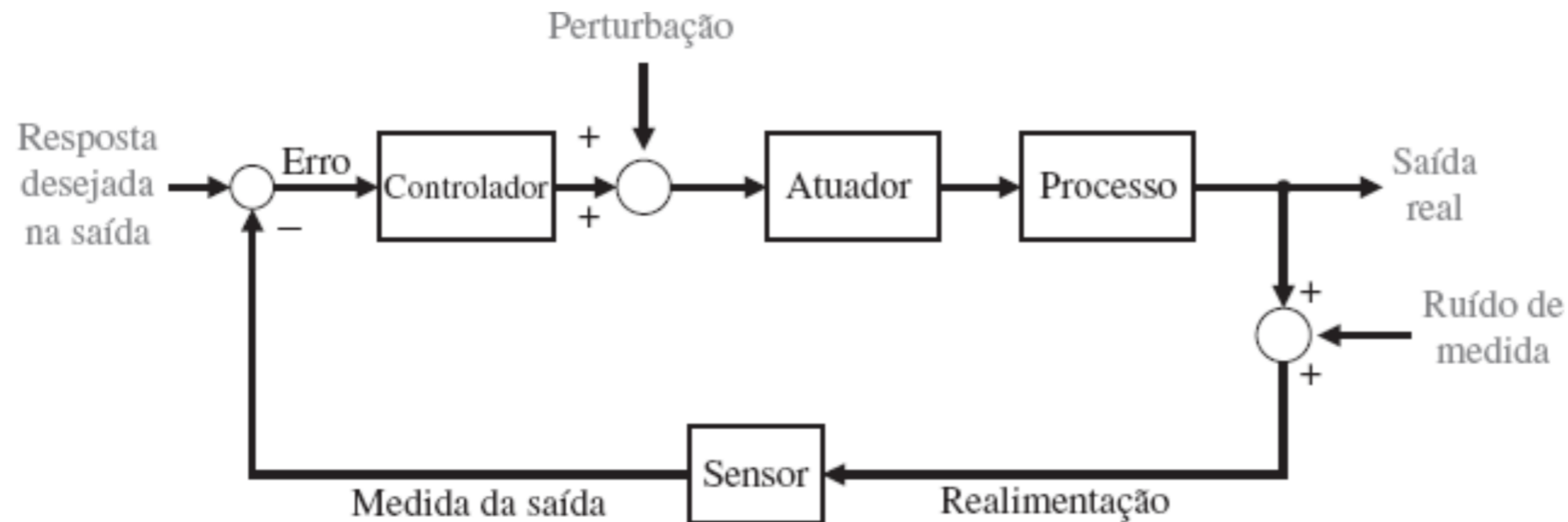


Malhas de controle

Malha fechando (acrescentando controle ou realimentação):

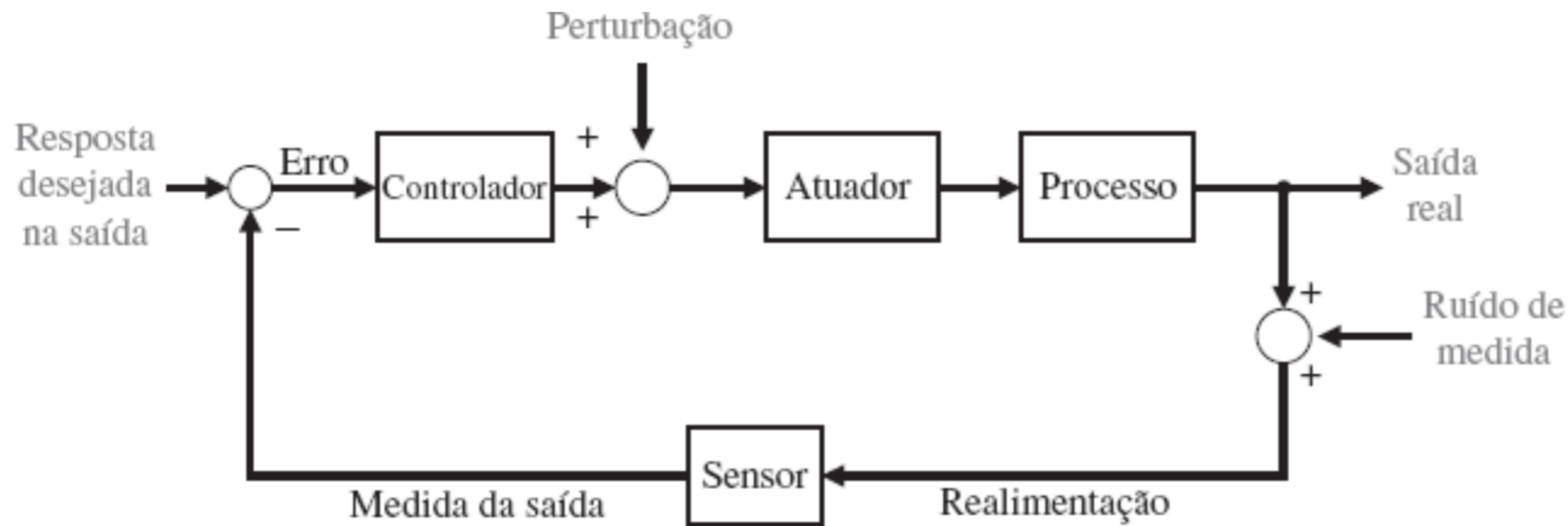


Acrescentando componentes (aproximando do "mundo real"):

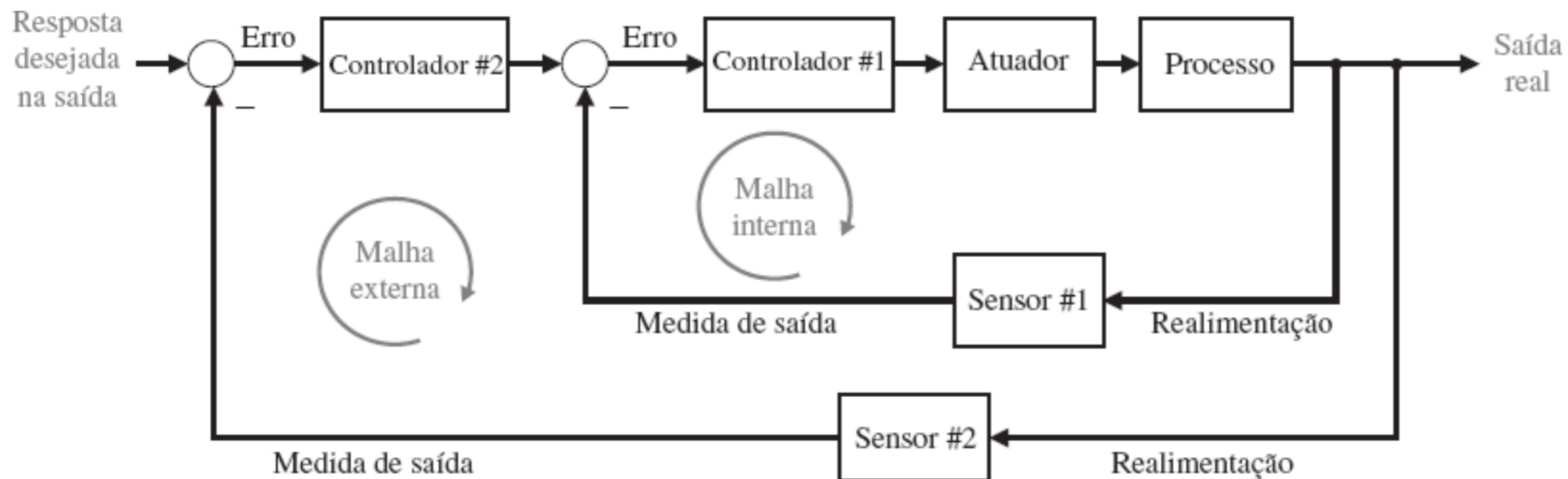


Malhas de controle

Acrescentando componentes (aproximando do “mundo real”):

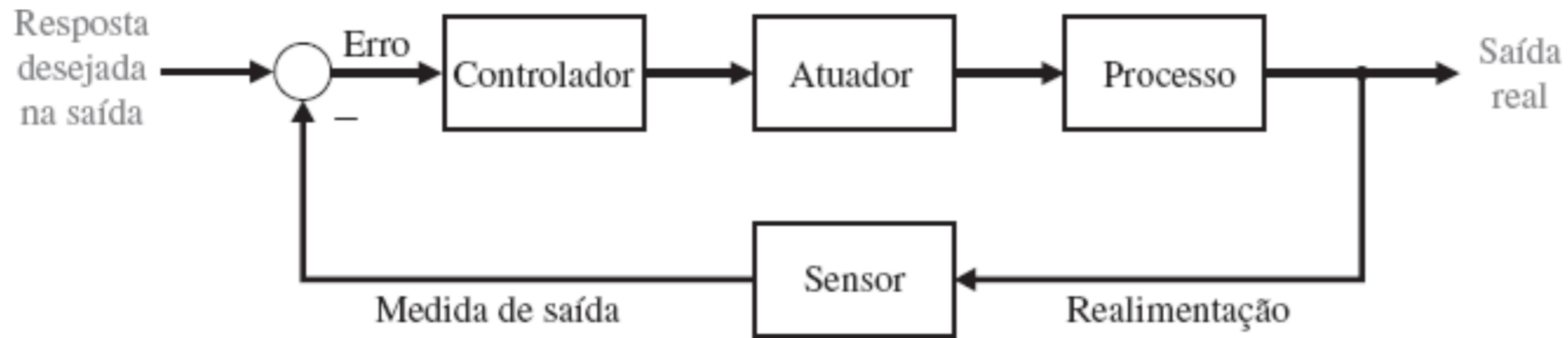


Sistemas com mais de uma realimentação:

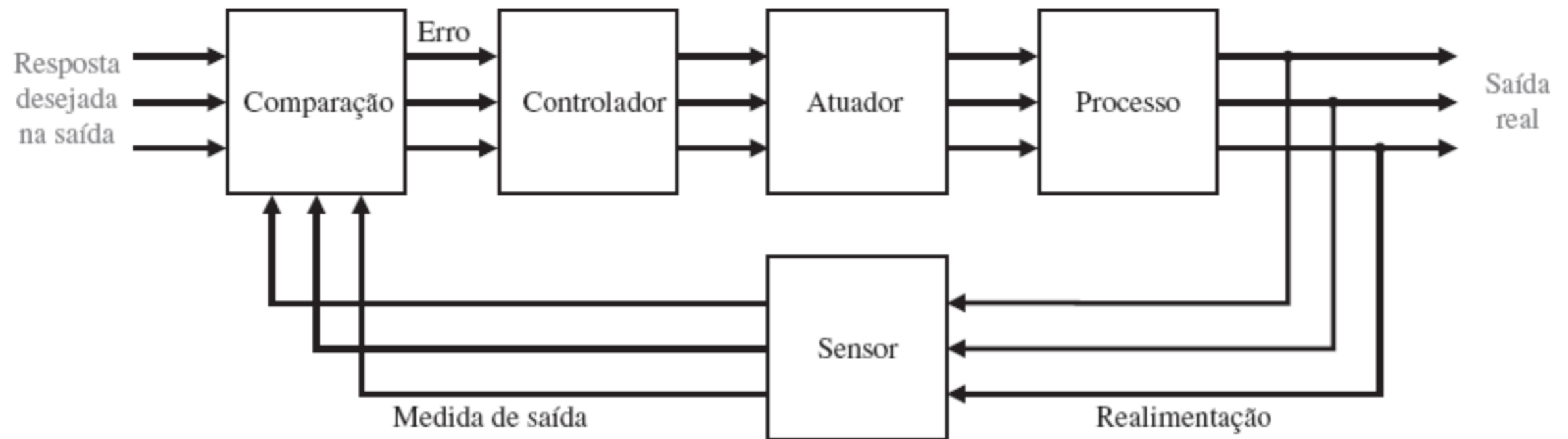


Malhas de controle

Malha fechando (acrescentando controle ou realimentação):

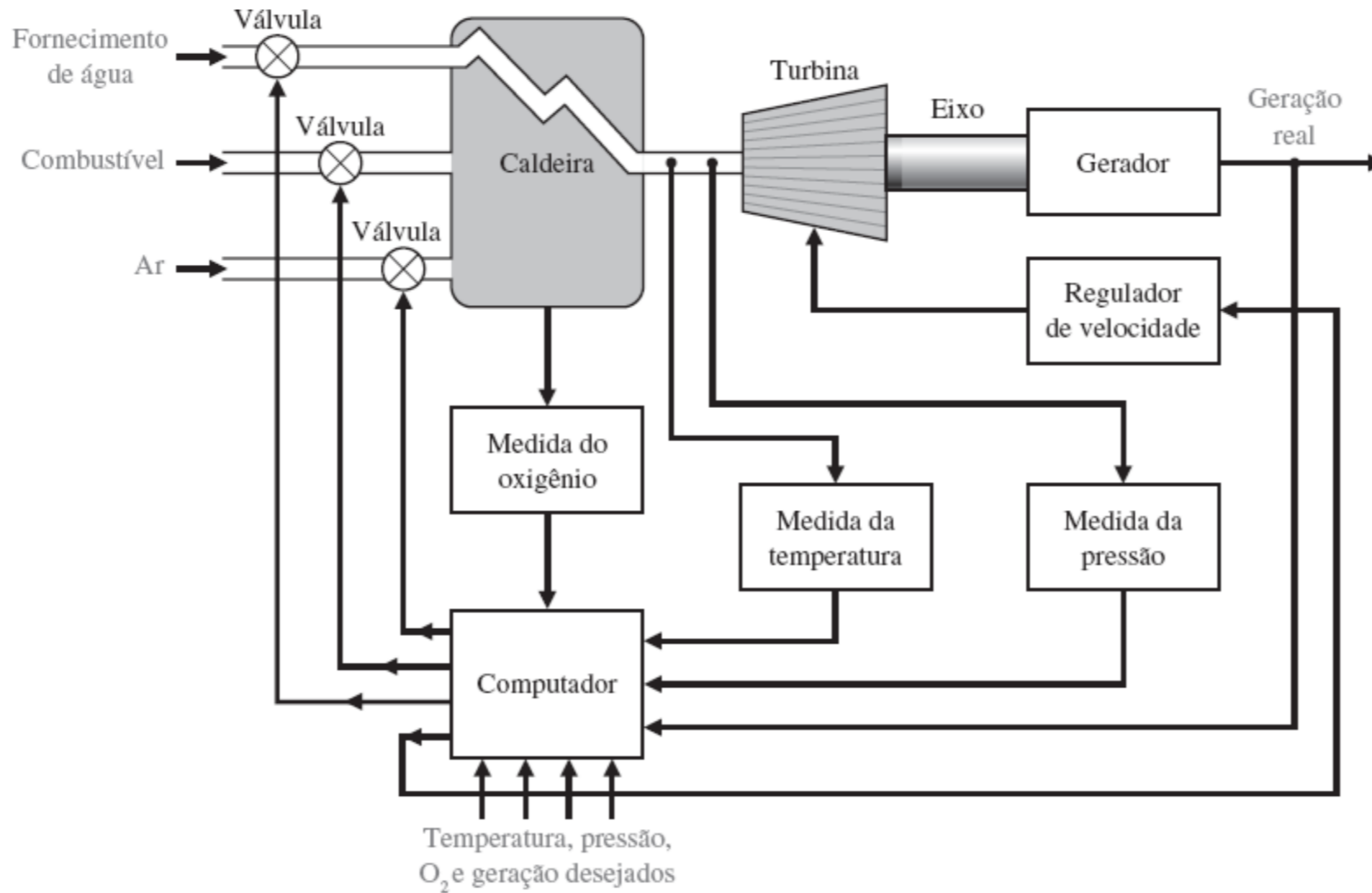


Sistema "MIMO": Múltiplas Entradas / Múltiplas Saídas

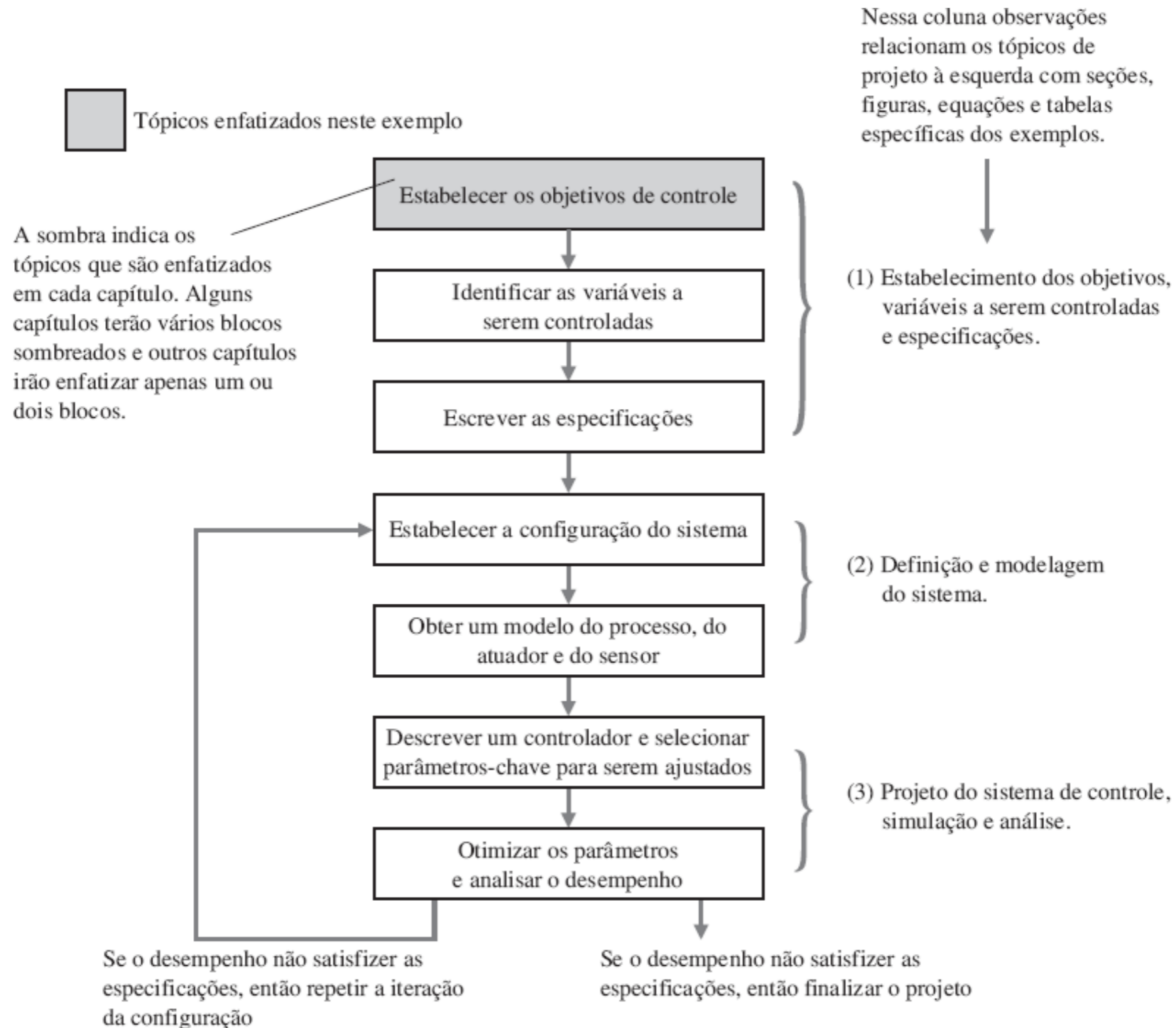


Malhas de controle

Exemplo:

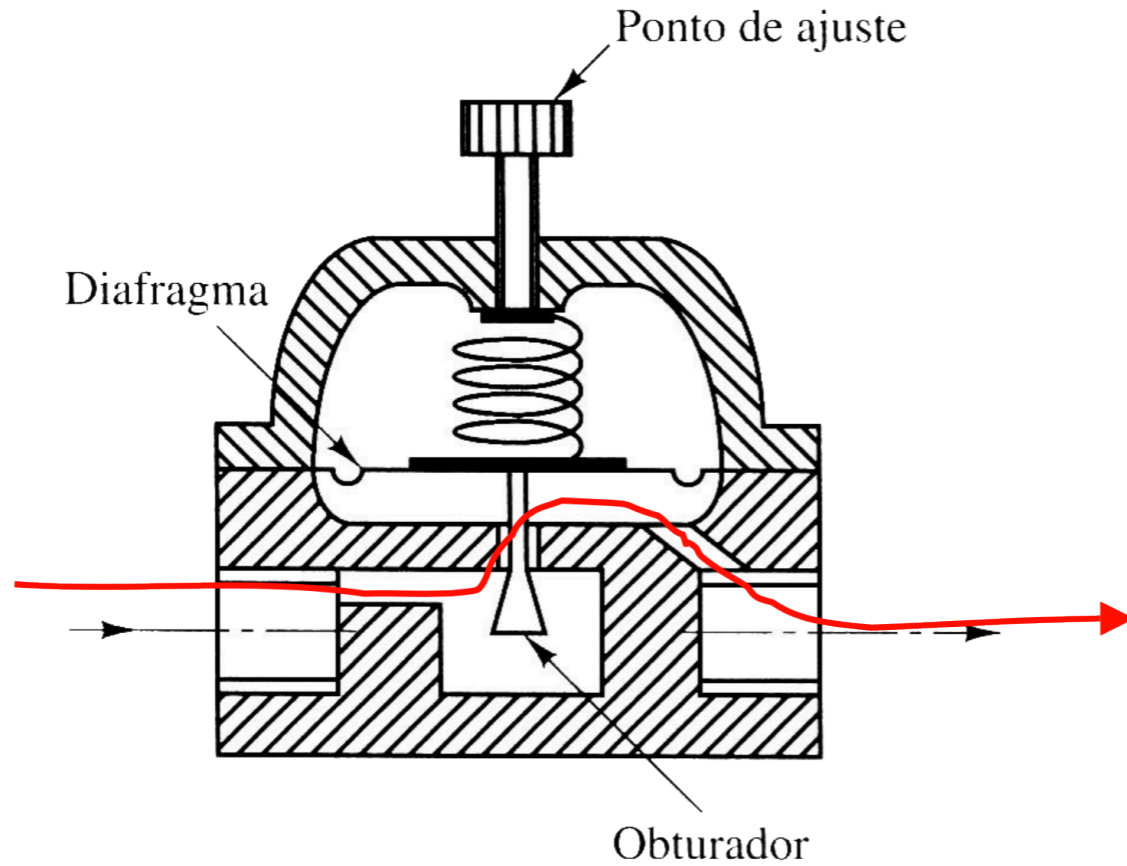


Projeto de um Sistema de Controle

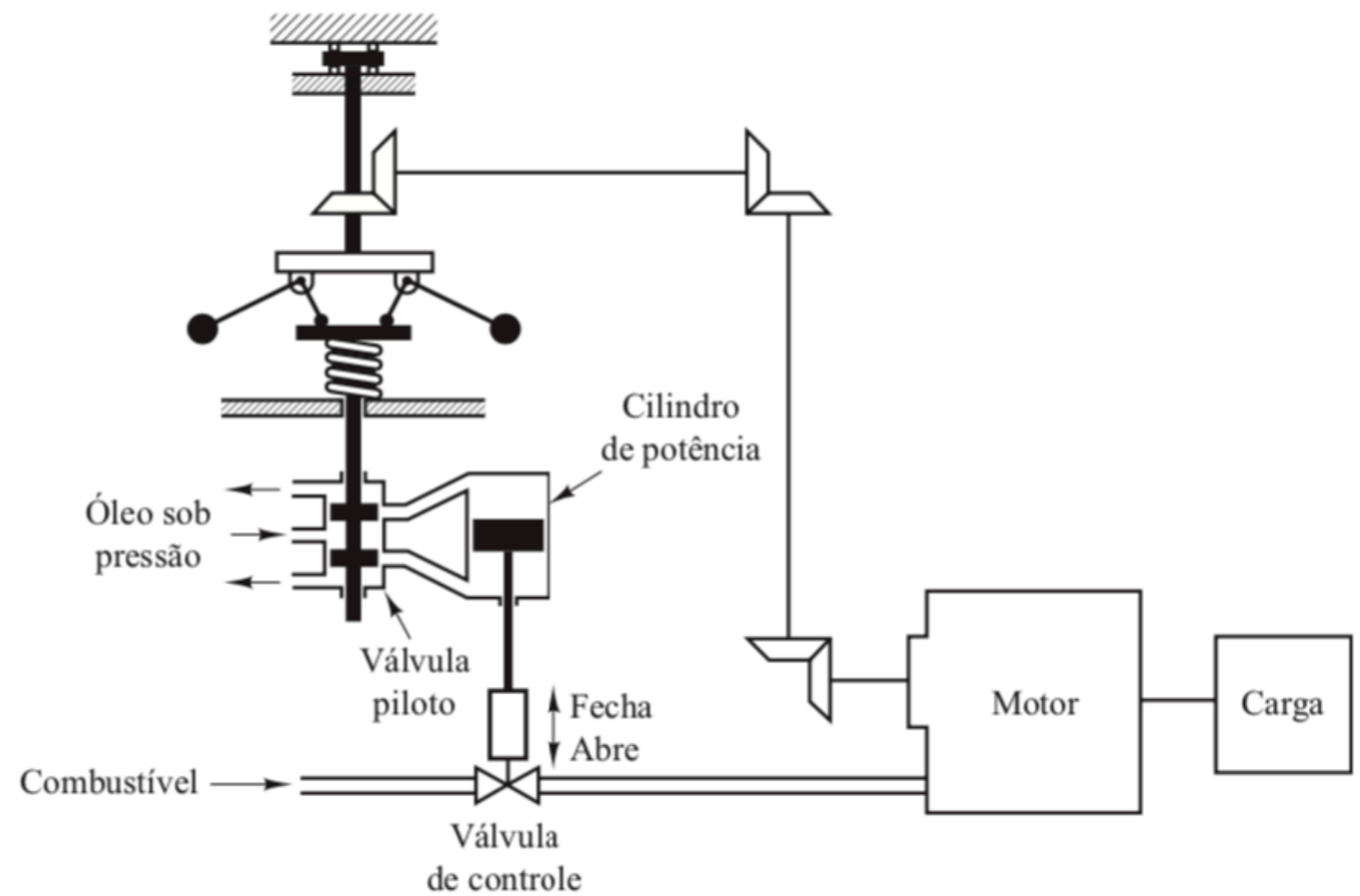


Controladores

Mecânicos:



Válvula redutora de pressão.
(Controlador auto-operado)



Controladores

❖ Eletrônicos / μ Processados

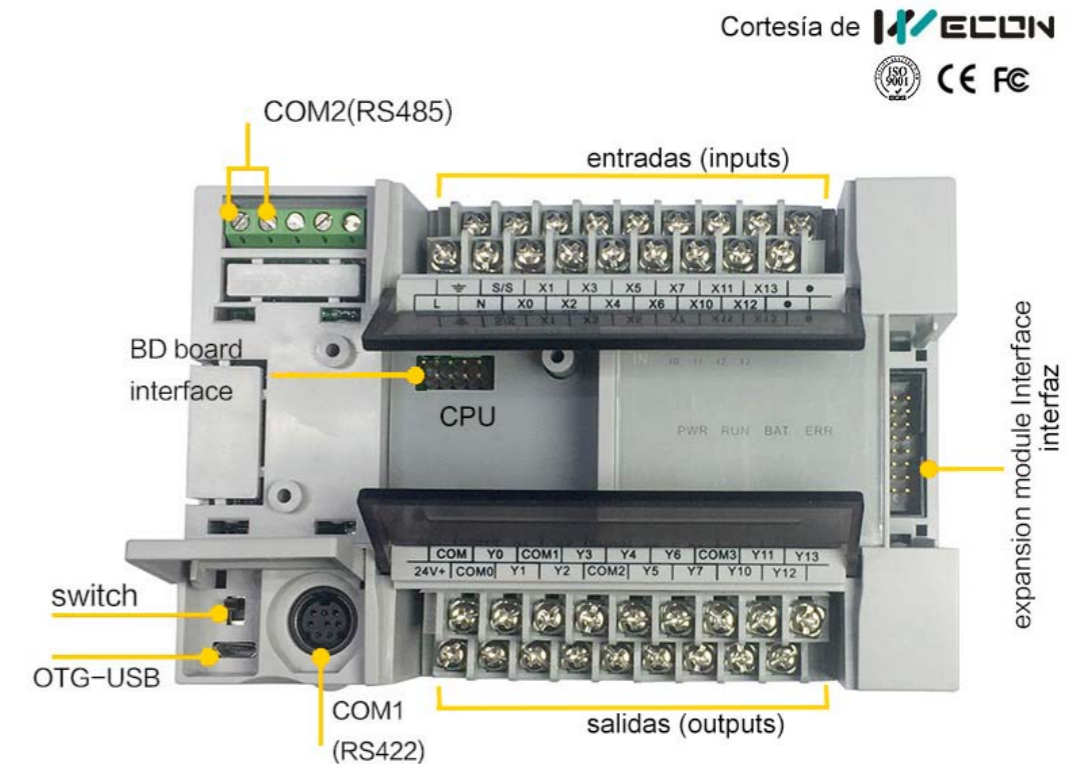
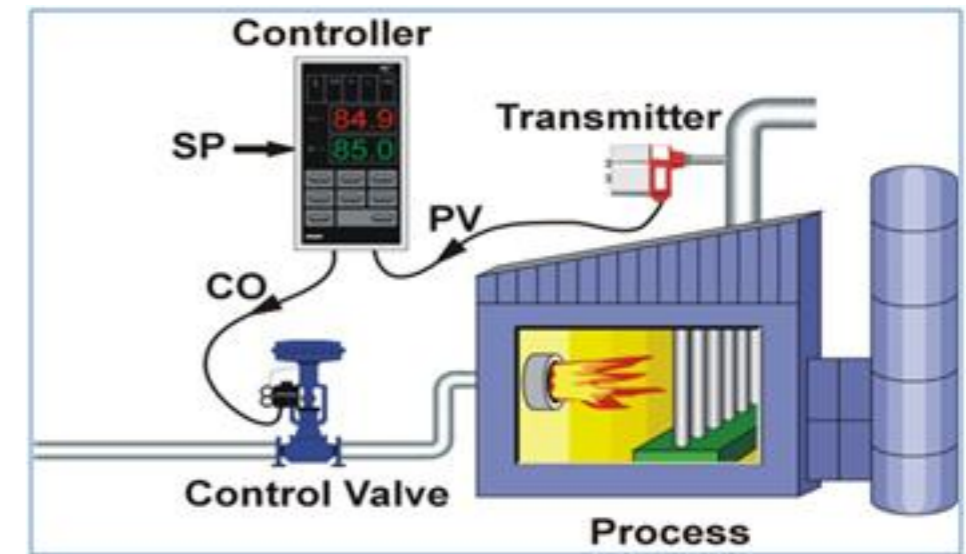
Jargões da área de automação industrial:

SP = Set Point (referência / ponto de ajuste);

PV = Process Variable (resposta do sistema);

CO = Control Output (sinal de controle).

MV = Manipulated Variable.

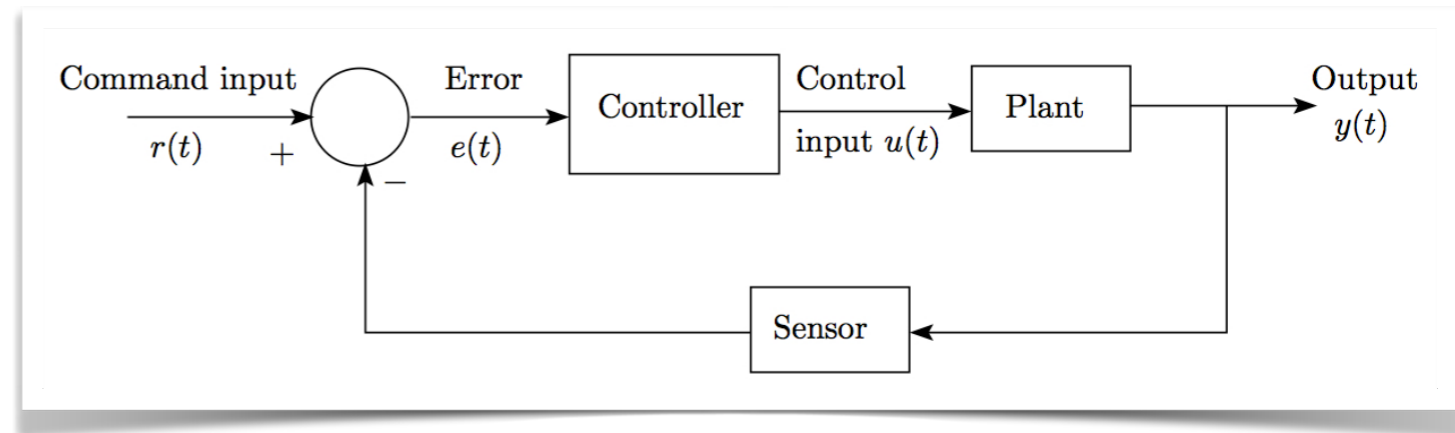


Ações de Controle

- ❖ Controlador de 2 posições ou liga-desliga (on/off);
- ❖ Controlador Proporcional (P)
- ❖ Controlador do tipo Integral (I)
- ❖ Controlador do tipo Proporcional e Integral (PI)
- ❖ Controlador do tipo Proporcional e Derivativo (PD)
- ❖ Controlador do tipo Proporcional, Integrativo e Derivativo (PID)

Controle de 2 posições (on/off)

- ❖ Possui apenas 2 posições fixas, em muitos casos, simplesmente “ligado” ou “desligado”.
- ❖ Simples e barato, usado industrialmente e em ambiente doméstico (Ex.: estufa de aquecimento → elemento bimetálico).



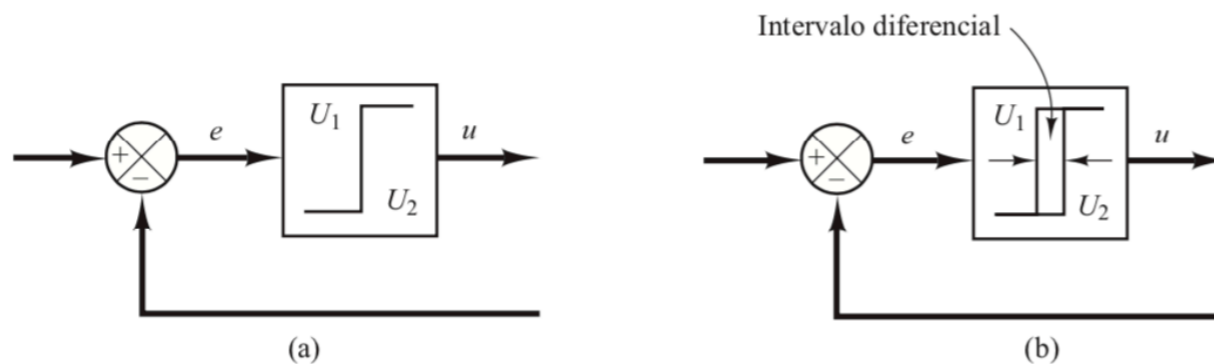
- ❖ Matematicamente:

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{para } e(t) > 0 \\ U_2, & \text{para } e(t) < 0 \end{cases}$$

onde U_1 e U_2 são constantes.

O valor mínimo U_2 é usualmente zero ou $-U_1$.

- ❖ Diagrama de bloco:



Exemplo: (a):

Seja certo processo controle de temperatura, suponha referência, $r(t) = 15^\circ\text{C}$.

Caso 1) temp. ambiente, $y(t) = 12^\circ\text{C} \Rightarrow$

$$e(t) = r(t) - y(t) = 15 - 12 = +3$$

$$\therefore e(t) > 0 \Rightarrow u(t) = U_1 \quad (+)$$

Caso 2) temp. ambiente, $y(t) = 18^\circ\text{C} \Rightarrow$

$$e(t) = r(t) - y(t) = 15 - 18 = -3$$

$$\therefore e(t) < 0 \Rightarrow u(t) = U_2 \quad (0)$$

Controle de 2 posições (on/off)

- ❖ Possui apenas 2 posições fixas, em muitos casos, simplesmente “ligado” ou “desligado”.
- ❖ Simples e barato, usado industrialmente e em ambiente doméstico (Ex.: estufa de aquecimento → elemento bimetálico).

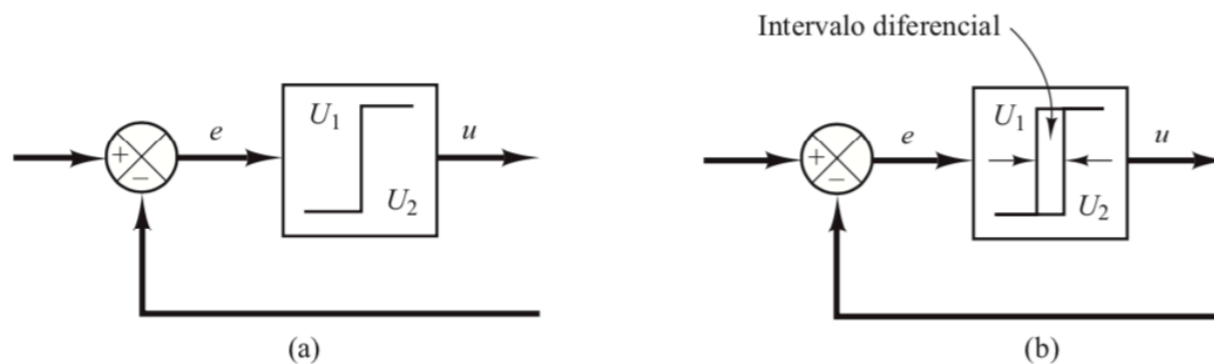
- ❖ Matematicamente:

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{para } e(t) > 0 \\ U_2, & \text{para } e(t) < 0 \end{cases}$$

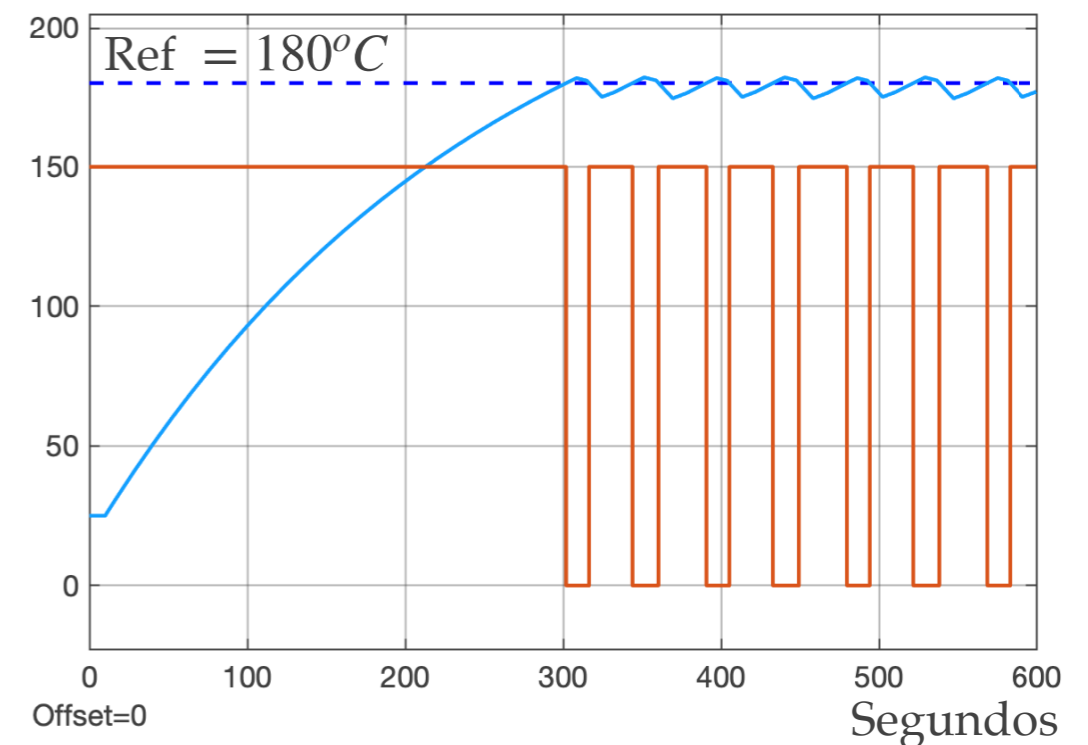
onde U_1 e U_2 são constantes.

O valor mínimo U_2 é usualmente zero ou $-U_1$.

- ❖ Diagrama de bloco:



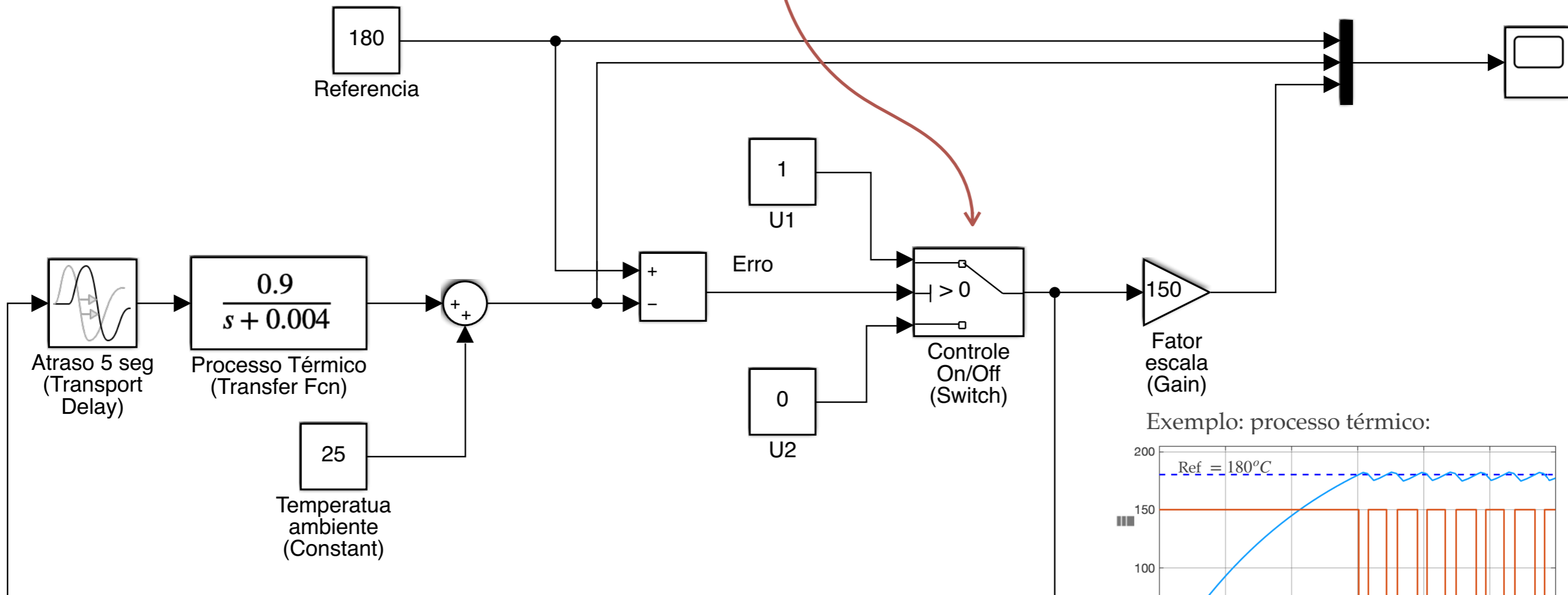
Exemplo: processo térmico:



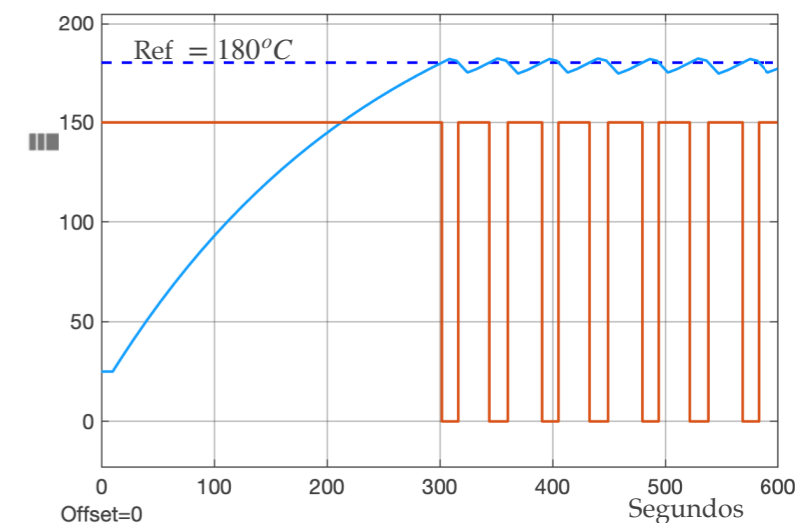
Controle de 2 posições (on/off)

- ❖ Simulação do processo térmico (forno elétrico; temp. Máxima = 230°C):

$$u(t) = \begin{cases} U_1 = 1, & \text{para } e(t) > 0 \\ U_2 = 0, & \text{para } e(t) < 0 \end{cases}$$



Exemplo: processo térmico:



Controle de 2 posições (on/off)

- ❖ Possui apenas 2 posições fixas, em muitos casos, simplesmente “ligado” ou “desligado”.
- ❖ Simples e barato, usado industrialmente e em ambiente doméstico (Ex.: estufa de aquecimento → elemento bimetálico).

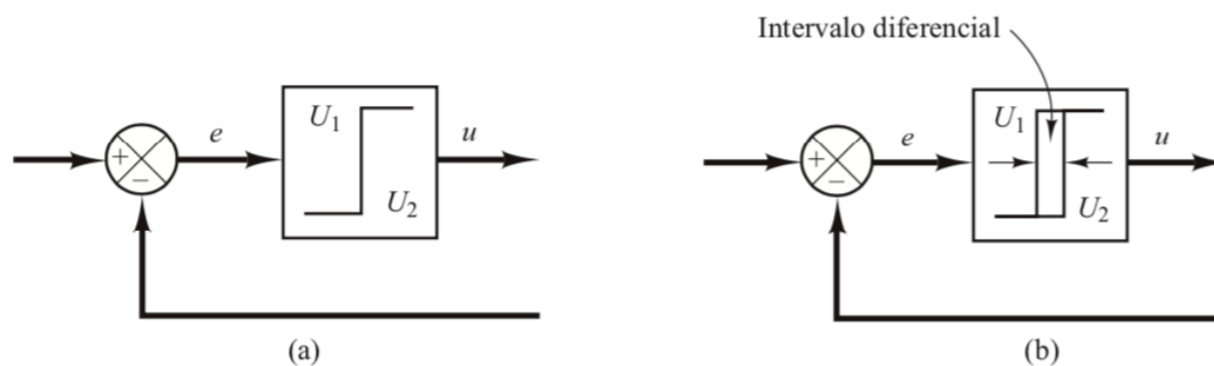
- ❖ Matematicamente:

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{para } e(t) > 0 \\ U_2, & \text{para } e(t) < 0 \end{cases}$$

onde U_1 e U_2 são constantes.

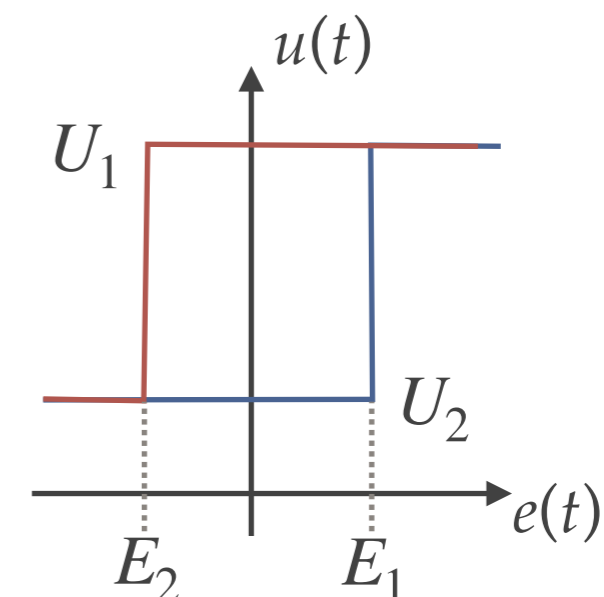
O valor mínimo U_2 é usualmente zero ou $-U_1$.

- ❖ Diagrama de bloco:



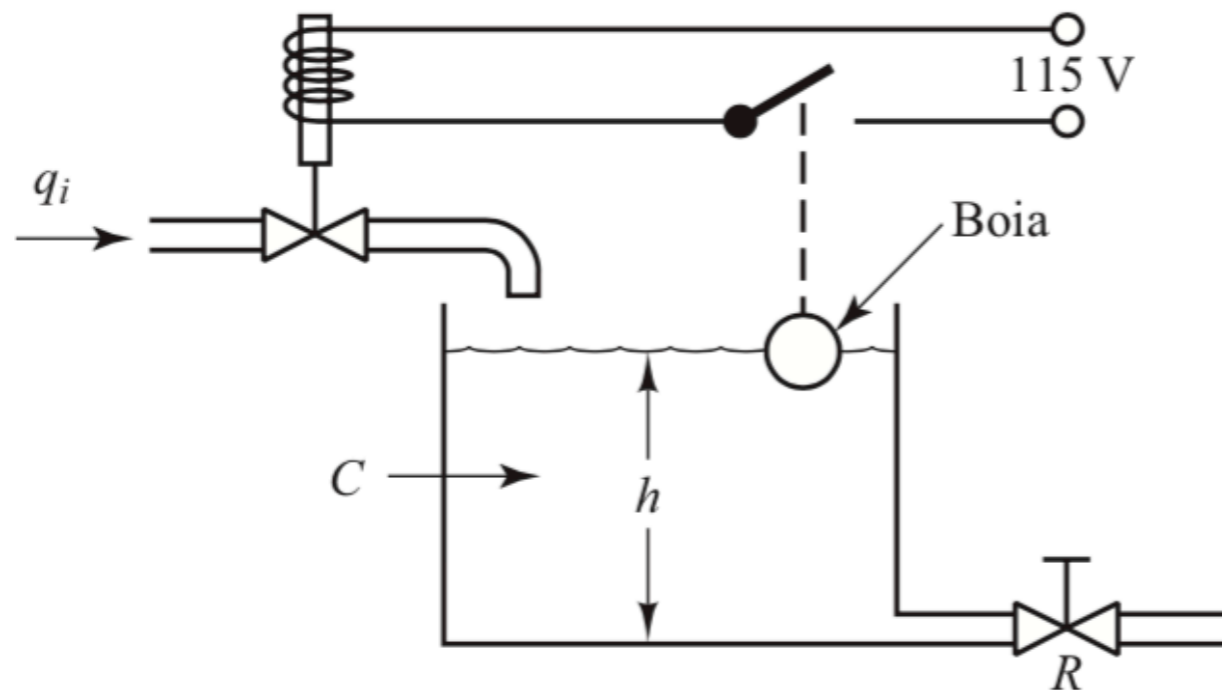
Eventualmente (em processos com ruído), se introduz uma **histerese** no controlador: figura (b), para evitar que o sistema de controle ligue/desligue com frequência elevada em torno de $e(t) \cong 0$:

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{para } e(t) > E_1 \\ U_2, & \text{para } e(t) < E_2 \end{cases}$$



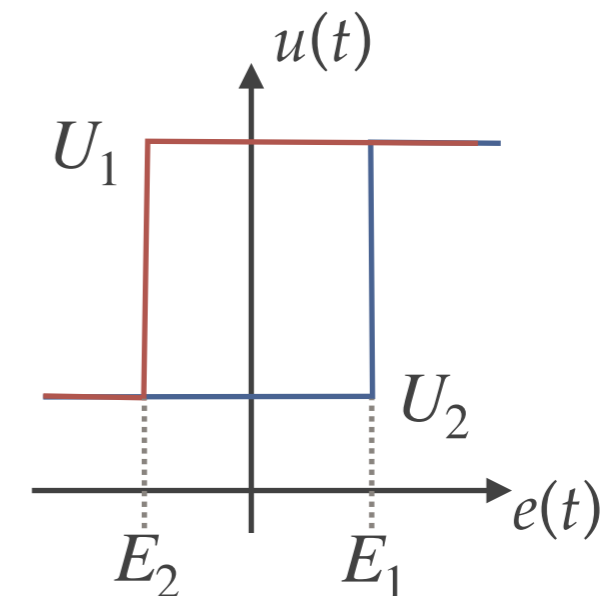
Controle de 2 posições (on/off)

- ❖ Possui apenas 2 posições fixas, em muitos casos, simplesmente “ligado” ou “desligado”.
- ❖ Simples e barato, usado industrialmente e em ambiente doméstico (Ex.: estufa de aquecimento → elemento bimetálico).
- ❖ Exemplo: controle de nível ←



Eventualmente (em processos com ruído), se introduz uma histerese no controlador: figura (b), para evitar que o sistema de controle ligue/desligue com frequência elevada em torno de $e(t) \cong 0$:

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{para } e(t) > E_1 \\ U_2, & \text{para } e(t) < E_2 \end{cases}$$



Resumo Ações Básicas de Controle

	$u(t)$	$U(s)/E(s)$
Proporcional (P)	$u(t) = K_p \cdot e(t)$	$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$
Integrativo (I)	$u(t) = K_i \int_0^t e(d)dt$	$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$
Proporcional-Integrativo (PI)	$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt$ $= K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t)dt$	$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}$ $= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$
Proporcional-Derivativo (PD)	$u(t) = K_p e(t) + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$ $= K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$	$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s$ $= K_p (1 + T_d s)$
Proporcional+Integrativo+Derivativo (PID)	$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$ $= K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t)dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$	$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$ $= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$

Obs.: Mundo contínuo (plano-s)

Controle Proporcional (P)

- ❖ O sinal de controle $u(t)$ é diretamente proporcional ao sinal do erro $e(t)$:

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

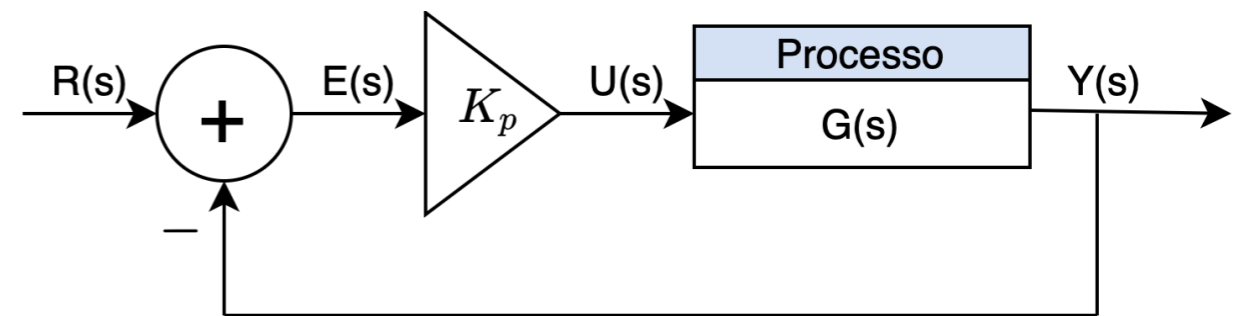
- ❖ Transformada de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

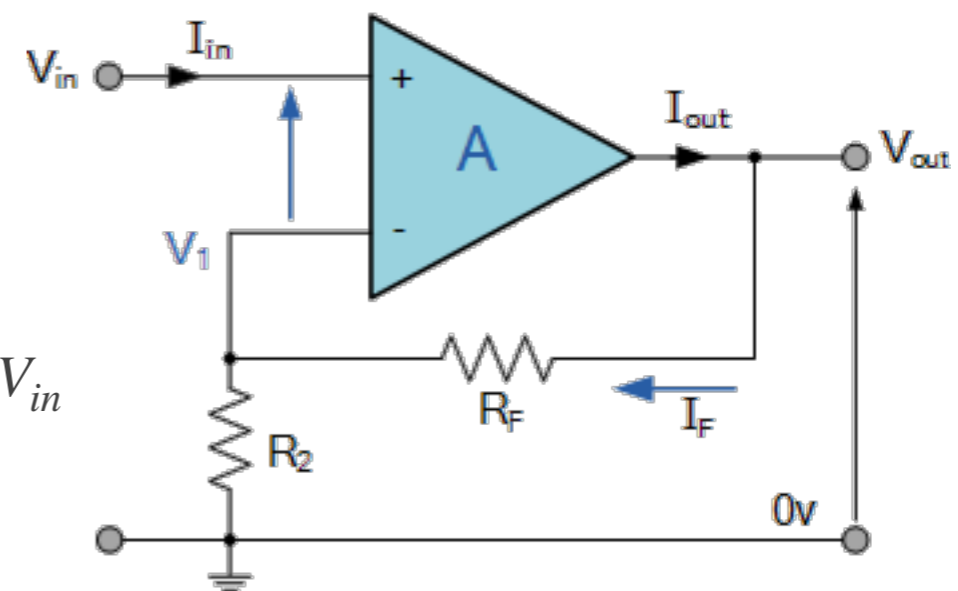
- ❖ K_p é o ganho proporcional.
- ❖ É essencialmente um amplificador de ganho ajustável.

$$V_{out} = \frac{R_2 + R_f}{R_2} V_{in} = \left(1 + \frac{R_f}{R_2} \right) V_{in}$$

- ❖ Diagrama de Blocos:



- ❖ Circuito Analógico:



Ação de Controle Integral (I)

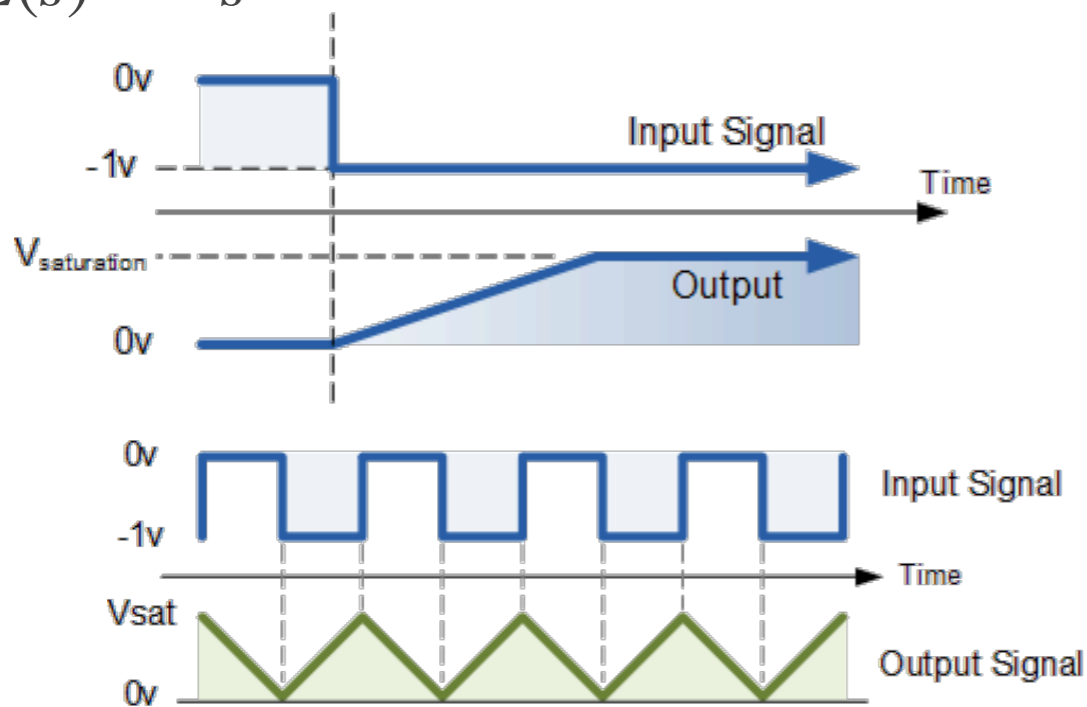
- ❖ O valor da saída $u(t)$ é modificado a uma taxa proporcional à:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(d)dt, \text{ ou,}$$

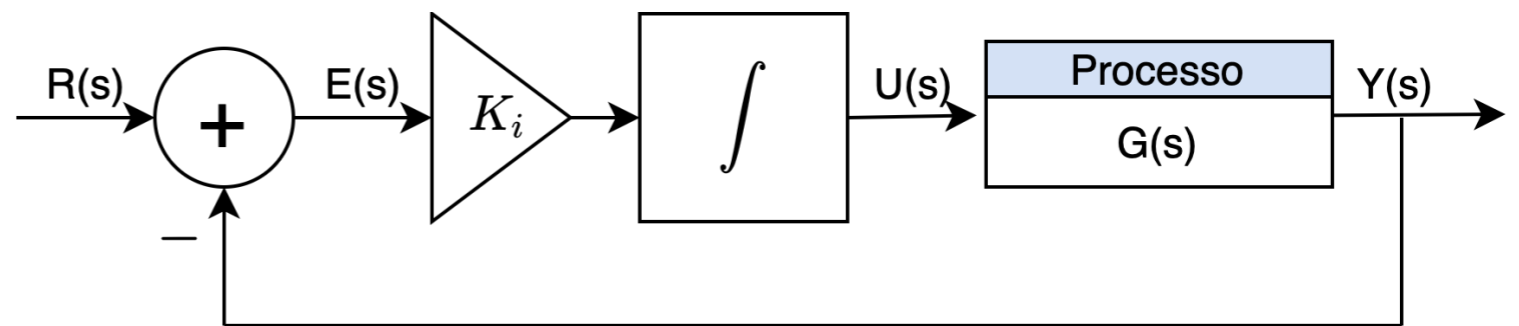
$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t)$$

- ❖ A função transferência deste controlador é:

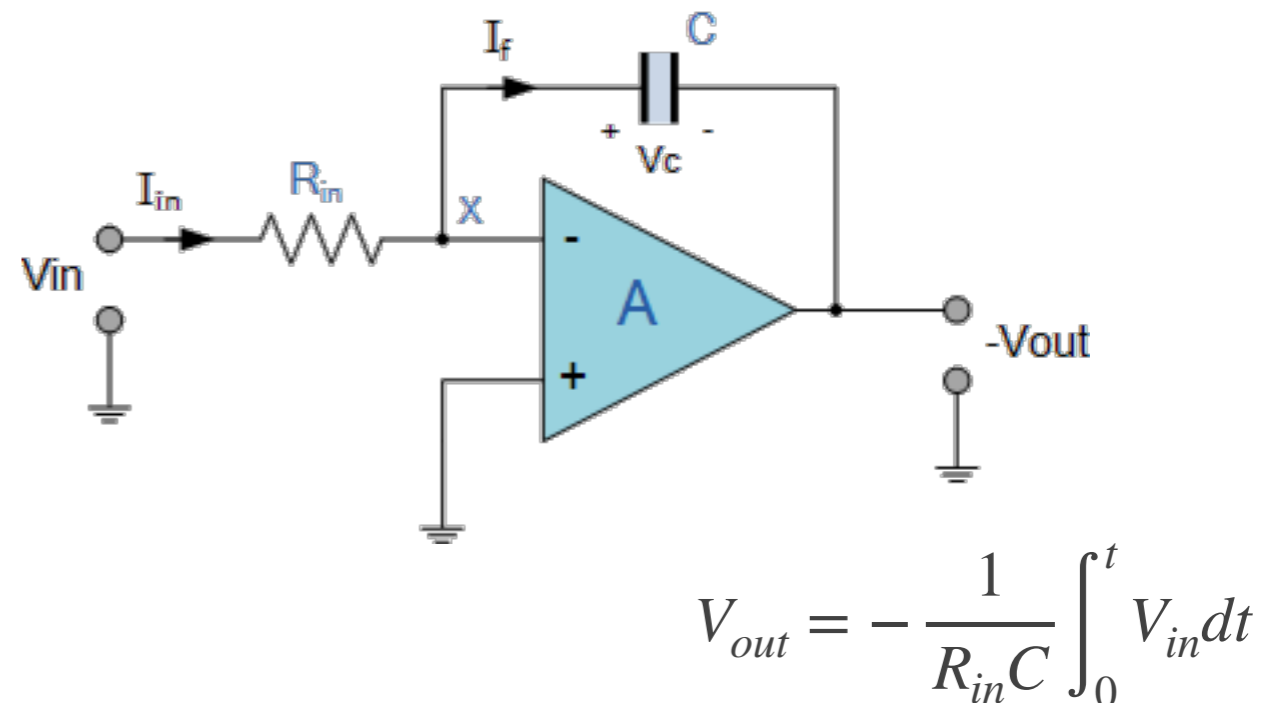
$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_1}{s}$$



- ❖ Diagrama de Blocos:



- ❖ Circuito analógico:

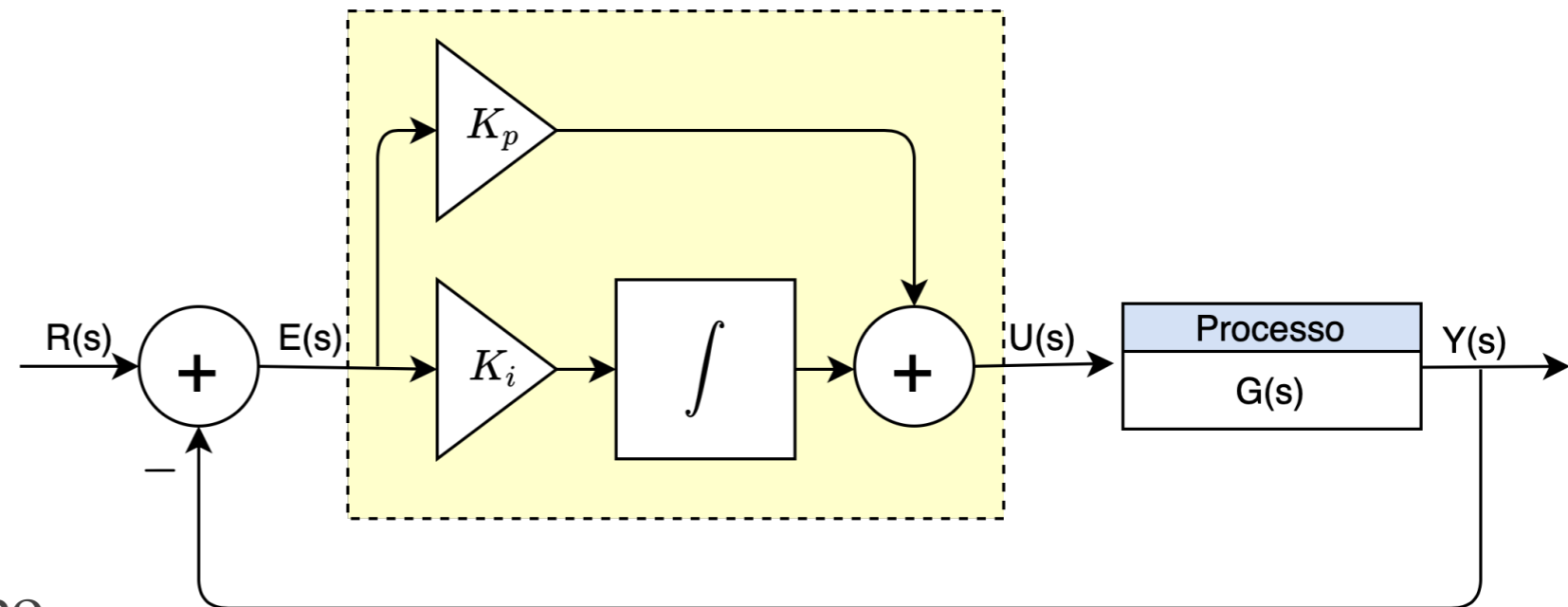


Ação Proporcional-Integral (PI)

- ❖ Esta ação de controle é definida por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt$$

- ❖ Diagrama de Blocos:



- ❖ Função transferência:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

- ❖ Eventualmente:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

onde T_i corresponde ao tempo integrativo.

Neste caso:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Ação Proporcional-Derivativa (PD)

❖ Neste caso:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

❖ Função transferência:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s$$

❖ Eventualmente:

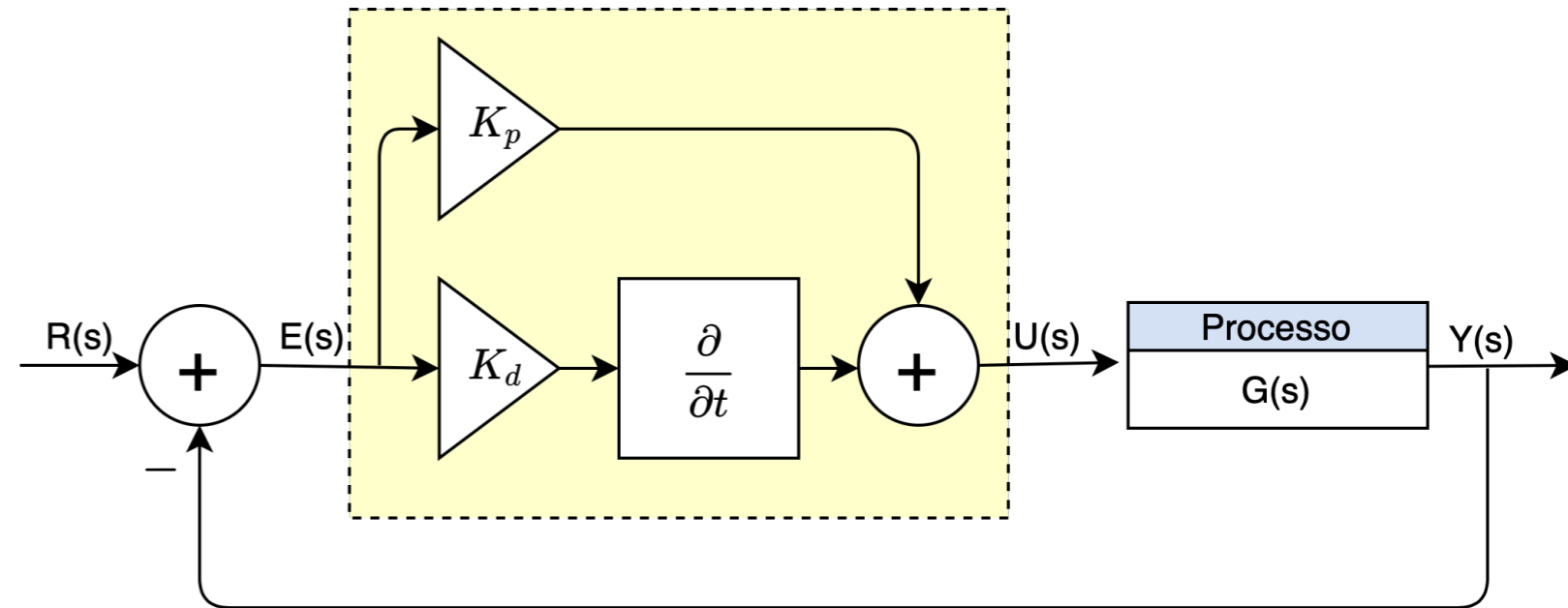
$$K_d = K_p \cdot T_d$$

onde T_d corresponde ao tempo derivativo.

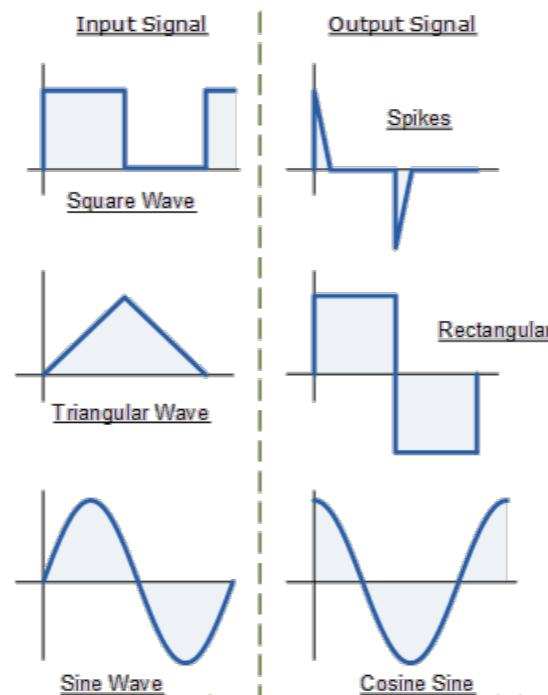
Neste caso:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

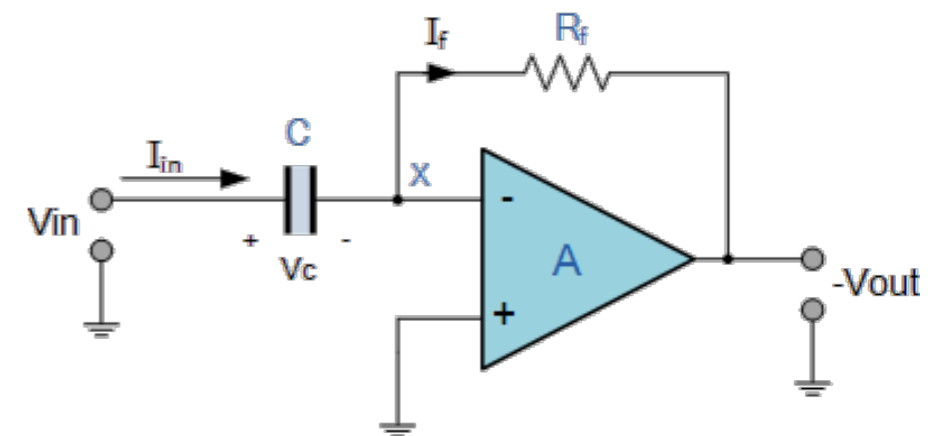
❖ Diagrama de Blocos:



❖ Circuito Analógico:



$$V_{out} = -R_f C \frac{dV_{in}}{dt}$$



Ação Proporcional-Integral-Derivativa (PID)

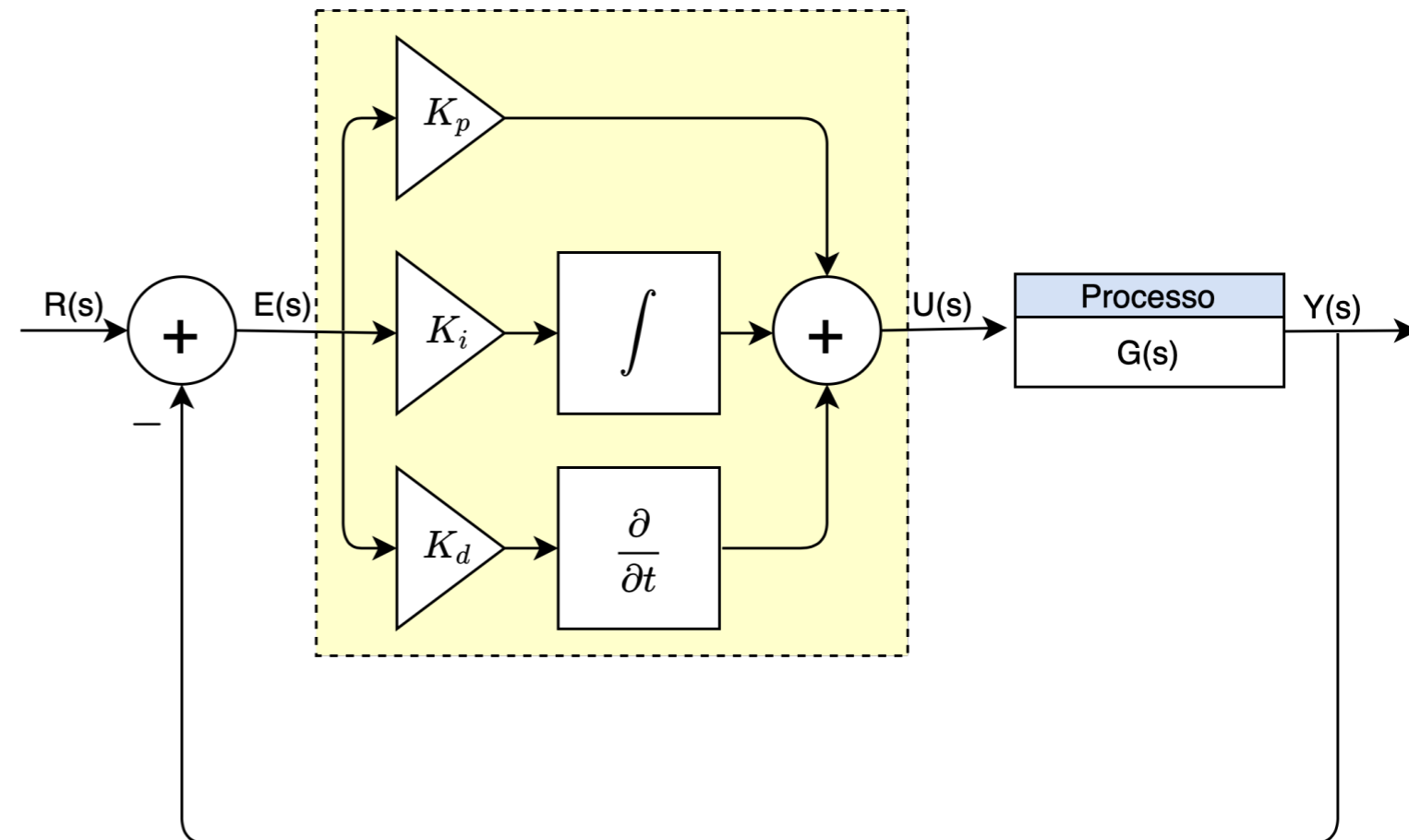
- ❖ Combinação das ações de controle proporcional+integral+derivativo:

$$u(t) = K_p e(t) + \underbrace{K_i}_{=\frac{K_p}{T_i}} \int_0^t e(t) dt + \underbrace{K_d}_{=K_p T_d} \frac{de(t)}{dt}$$

- ❖ Função transferência:

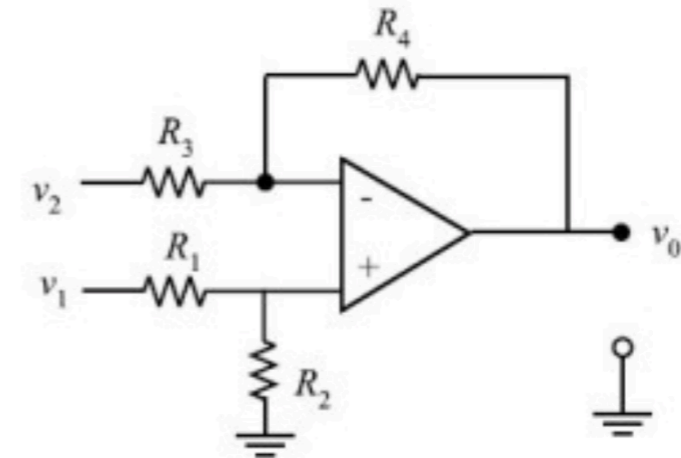
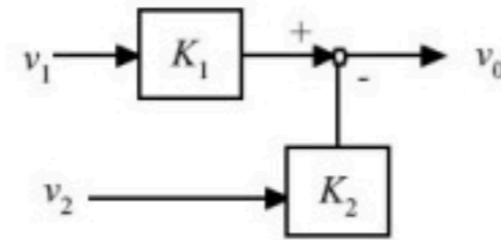
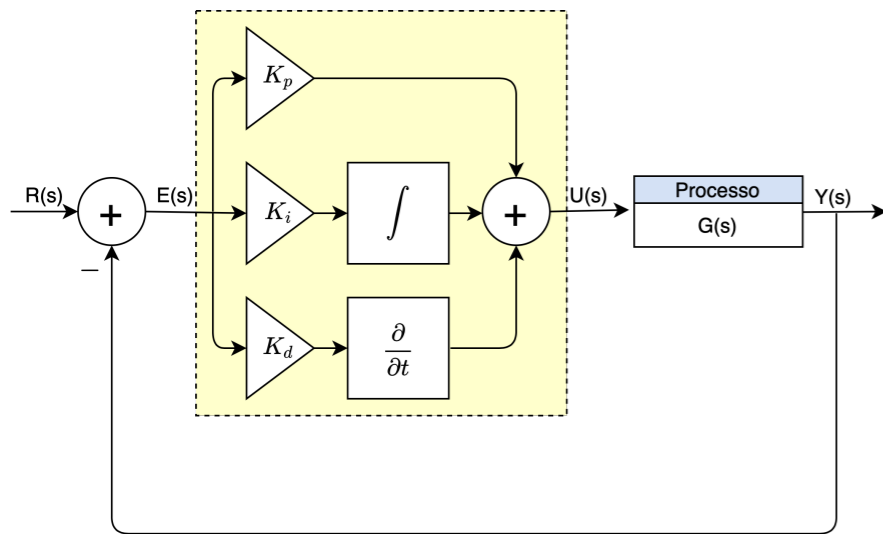
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \text{ ou:}$$
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

- ❖ Diagrama de Blocos:

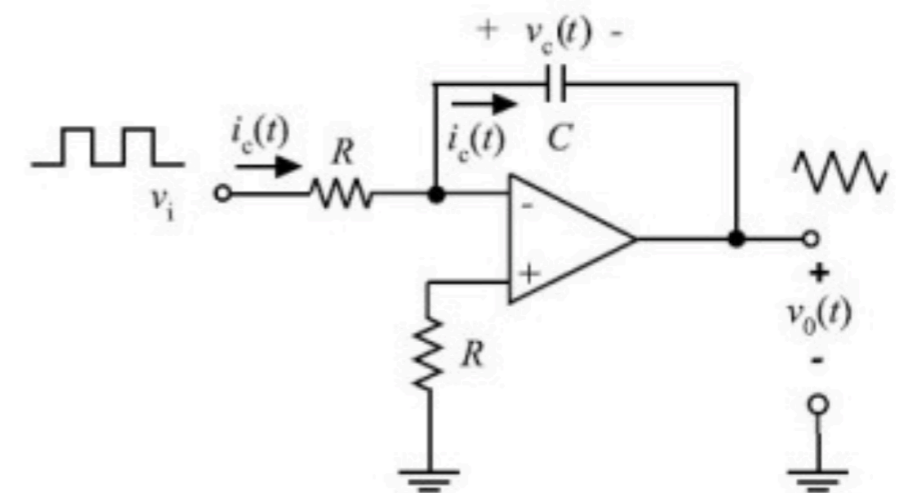
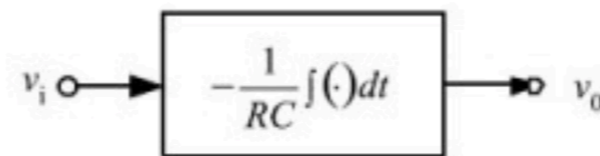
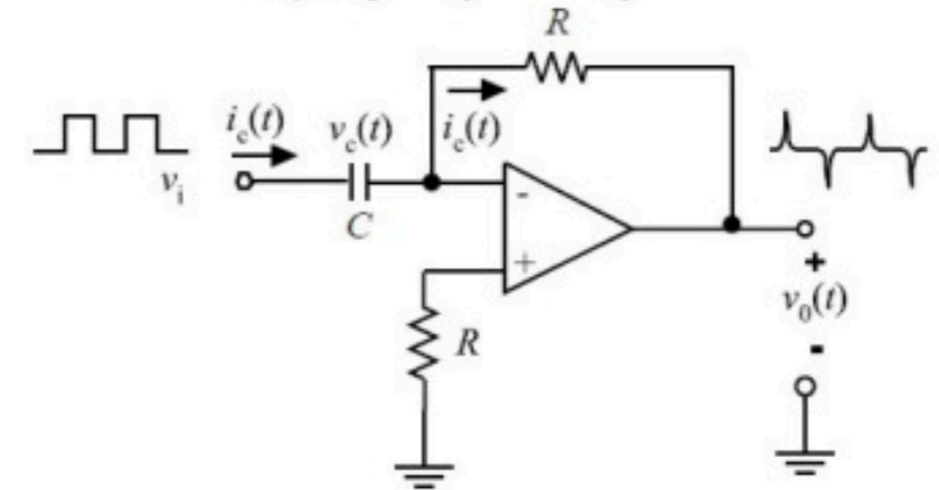
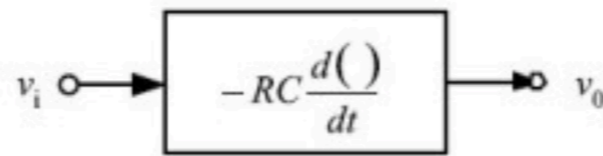


Ação Proporcional-Integral-Derivativa (PID)

❖ Circuitos \Rightarrow Estruturas básicas:

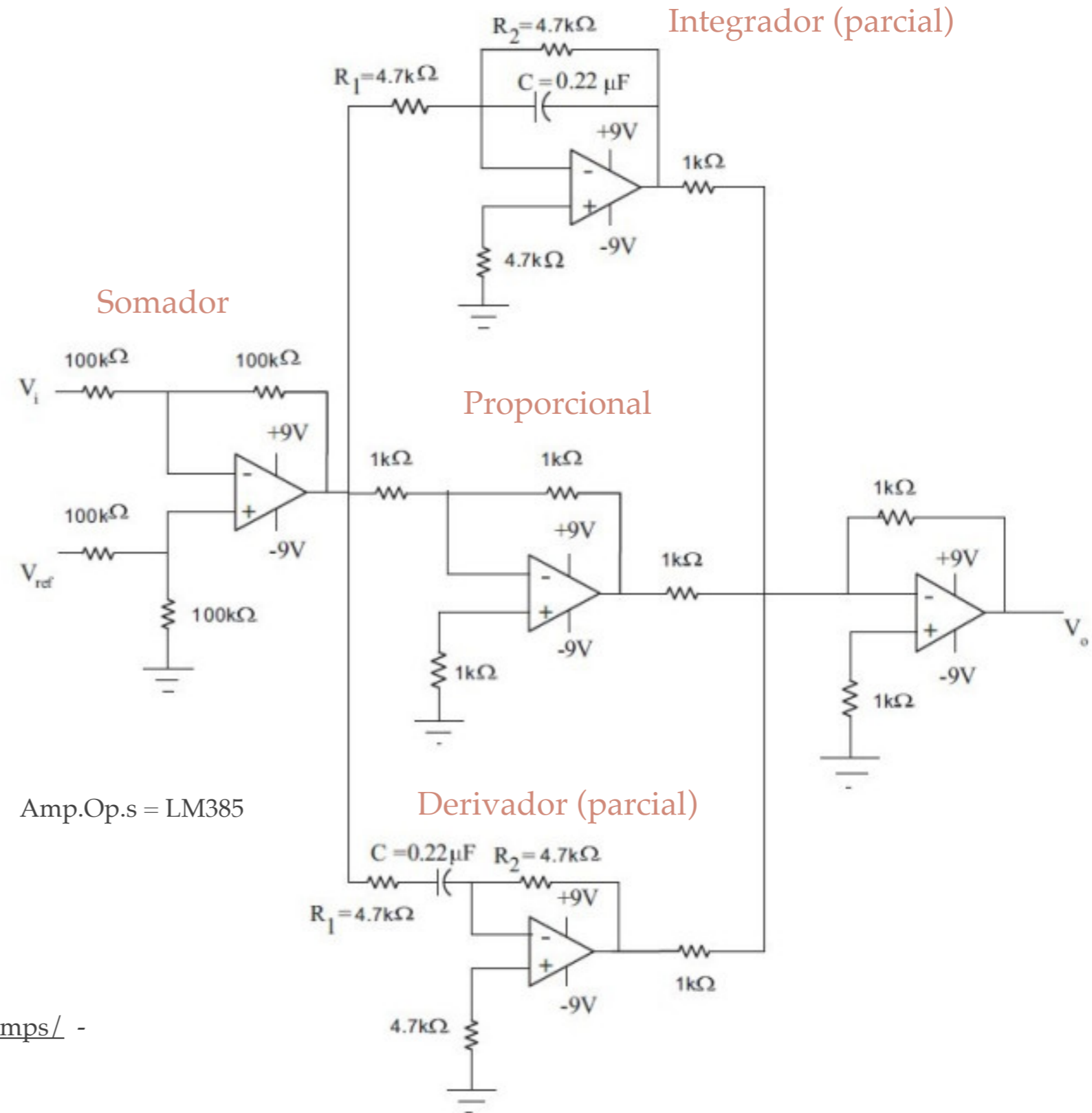
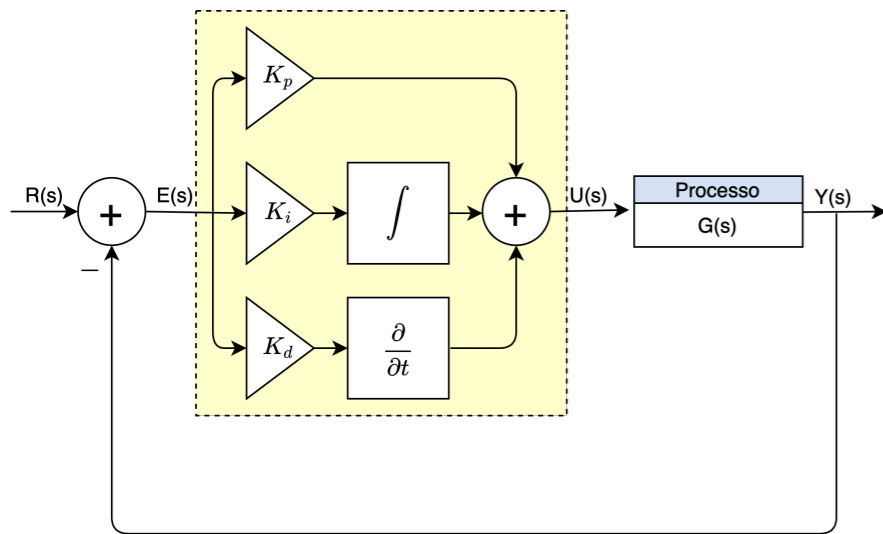


$$v_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_3 + R_4}{R_3} v_1 - \frac{R_4}{R_3} v_2$$



Ação Proporcional-Integral-Derivativa (PID)

❖ Circuito 2) Exemplo de PID analógico



Ref.: Analog PID Control Using Op-Amps (<https://neelpmehta.wordpress.com/analog-pid-control-using-op-amps/> - acessado em Ago/2020)

Outras ações de Controle

- ❖ Controlador por Atraso de Fase (Lag) $\rightarrow \cong$ PI;
- ❖ Controlador por Avanço de Fase (Lead) $\rightarrow \cong$ PD;
- ❖ Controlador por Avanço-Atraso de Fase (Lead-Lag) $\rightarrow \cong$ PID

- ❖ Diferença em relação aos anteriores: estes podem ser construídos usando redes passivas (circuitos RC).