107484 – Controle de Processos

Aula: Ações de Controle

Prof. Eduardo Stockler Tognetti

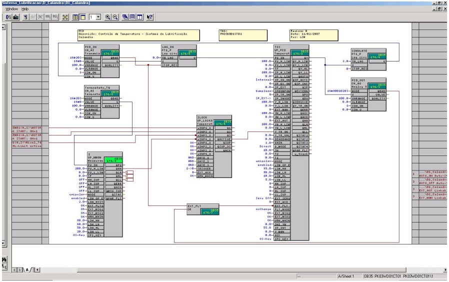
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília – UnB

1º Semestre 2020

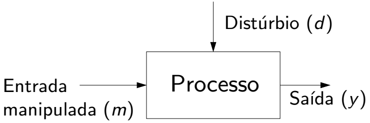
Motivação

Uso na indústria de controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

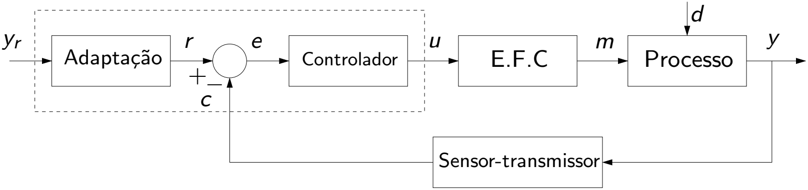
- Largo uso industrial (90% [Yamamoto & Hasimoto, 1991]).
- Ações de controle e sintonia de fácil entendimento.
- Bom compromisso simplicidade-desempenho.
- Malhas mal ajustadas (80% [Bialkowski, 1991]) $\rightsquigarrow$ oportunidades.



Esquemático do sistema em malha fechada



Esquemático do sistema em malha aberta.



Esquemático do sistema em malha fechada.

- y, y_r, m, d: unidade de engenharia (UE)
- c, r: $0 \sim 100\%$ da UE de y (calibração do transmissor)
- u: $0 \sim 100\%$ da UE de m (calibração do atuador)
- e: $-100 \sim 100\%$

Ação proporcional

Controlador Proporcional

$$u(t) = \overline{u} + K_c e(t) \tag{1}$$

- Erro de regime estacionário (sistemas sem pólos na origem: $e(t) = 0$ somente se $K_c \rightsquigarrow \infty$ para entrada degrau)
- $K_c \to \infty \rightsquigarrow$ controle liga-desliga (possível instabilidade)
- Banda proporcional: $BP = 100/K_c \rightsquigarrow$ faixa de erro tal que ação de controle está no intervalo [0, 100]%

- Em termos da variável de desvio:

$$\tilde{u}(t) \triangleq u(t) - \overline{u}$$

$$\tilde{u}(t) = K_c e(t)$$

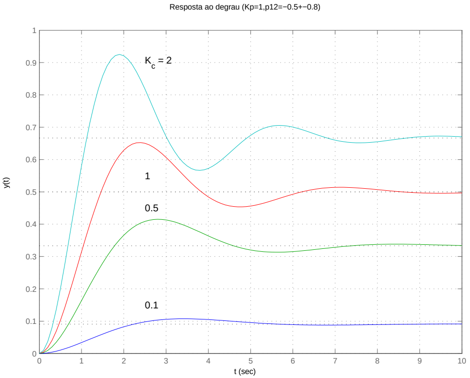
$$G_c(s) = \frac{\tilde{U}(s)}{E(s)} = K_c$$

Ação proporcional

Resposta ao degrau unitário do sistema em malha fechada com controlador P e sistema de 2a ordem

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

- Aplicação típica: $\rightsquigarrow$ controle de nível



Ação integral

Controlador Proporcional-Integral (PI)

$$u(t) = \overline{u} + K_c e(t) + K_c \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \qquad (3)$$

T_i: constante de tempo integral ou tempo de reset [seg., min.]
Características:

- Erro de regime permanente nulo para entradas do tipo degrau
- Se a saída $u(t)$ saturar e $e(t) \neq 0$ $\rightsquigarrow$ crescimento do termo integral (*integral windup*)

- Função de transferência:

$$G_c(s) = \tilde{U}(s)/E(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

- Observe que para erro constante: $e(t) = e$

$$\tilde{u}(T_i) = K_c e + K_c e = 2K_c e$$

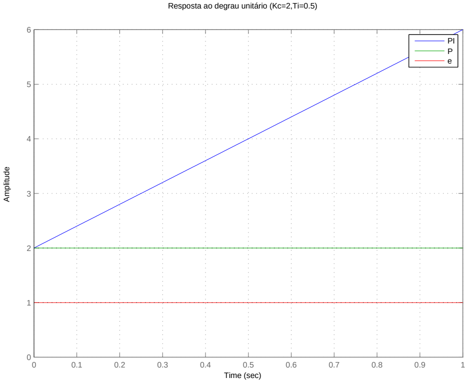
$\rightsquigarrow$ O ganho integral repete a ação proporcional a cada T_is.

Ação integral

Resposta $u(t)$ ao degrau unitário de $e(t)$: controlador P e PI com $K_c = 2$ e $T_i = 0.5$.

- Aplicação típica:

$\rightsquigarrow$ controle de vazão, nível e pressão



Ação derivativa

Controlador Proporcional-Derivativo (PD)

$$u(t) = \overline{u} + K_c e(t) + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \tag{4}$$

T_d: constante de tempo derivativa [seg., min.]

- Ação antecipatória (antecipa a ação proporcional em T_d s.)
- Função de transferência ($\tilde{u}(t) \triangleq u(t) - \overline{u}$):

$$G_c(s) = \frac{\tilde{U}(s)}{E(s)} = K_c(1 + T_d s)$$

- Sensível a ruídos de alta frequência. Opção com filtro na ação derivativa:

$$\frac{\tilde{U}(s)}{E(s)} = K_c\left(1 + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1}\right) = K_c\left(\frac{(\alpha+1)T_d s + 1}{\alpha T_d s + 1}\right), \quad 1/(\alpha T_d) \gg 0 \tag{5}$$

$\rightsquigarrow$ controlador avanço-atraso cujo termo avanço é a parte derivativa

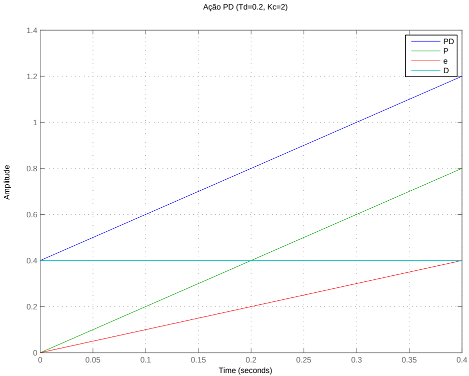
- Filtro de 1ª ordem com ganho unitário e $\tau = \alpha T_d$
- αT_d pequeno, $\alpha \in [0{,}05,\ 0{,}2]$
- Filtro não afeta o desempenho

Ação derivativa

Resposta $u(t)$ a rampa unitária de $e(t)$: controlador P e PD e D com $K_c = 2$ e $T_d = 0.2$.

- Aplicação típica:

PD $\rightsquigarrow$ sistemas com inércia
PID $\rightsquigarrow$ controle de temperatura



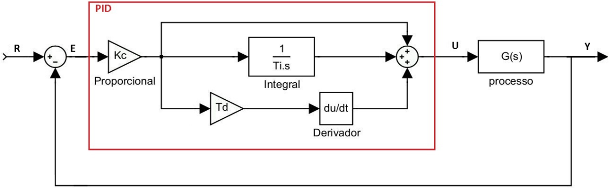
Controlador PID

Ações de controle

- Ação proporcional $\rightsquigarrow$ $\tilde{u}(t) = K_c e(t), \qquad \tilde{u}(t) \triangleq u(t) - \overline{u}$
- Ação integral $\rightsquigarrow$ $\tilde{u}(t) = K_c \dfrac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau$
- Ação derivativa $\rightsquigarrow$ $\tilde{u}(t) = K_c T_d \dfrac{de(t)}{dt}$

Forma padrão do controlador PID:

$$u(t) = \overline{u} + K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \implies \frac{\tilde{U}(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (6)$$



Funções e Transferência – Controladores PID

Controlador PI

$$G(s) = K_c\left(1+\frac{1}{sT_i}\right) = K_c\left(\frac{1+sT_i}{sT_i}\right)$$

$\rightsquigarrow$ 1 polo na origem e 1 zero em $-\dfrac{1}{T_i}$

Controlador PID

$$G(s) = K_c\left(1+\frac{1}{sT_i}+sT_d\right) = K_c\left(\frac{1+T_is+T_iT_ds^2}{sT_i}\right)$$

$\rightsquigarrow$ 1 polo na origem e 2 zeros no semiplano esquerdo do plano-s, ou seja, com parte real negativa

Algoritmos PID

Paralela clássica (ideal, ISA, padrão)

$$G_c(s) = K_c\left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d\right) \tag{7}$$

Série (interativa,real)

$$G_c(s) = K_c'\left(1 + \frac{1}{sT_i'}\right)\left(1 + T_d's\right) \tag{8}$$

ou

$$G_c(s) = K_c'\left(1 + \frac{1}{sT_i'}\right)\left(\frac{1 + sT_d'}{1 + \alpha sT_d'}\right) \tag{9}$$

- Implementável fisicamente (controladores analógicos ou pneumáticos)
- Todos os parâmetros interagem; zeros reais; valores típicos $\alpha \in [0.05 \quad 0.2]$

Expandida (paralela alternativa, não interativa)

$$G_c(s) = K_c'' + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{10}$$

- Maior flexibilidade; pouca interpretação física dos parâmetros

Efeito das ações de controle

Ação	Tempo de resposta (t_r)	Sobressinal (M)	Tempo de acomodação (t_s)	Erro regime permanente ($e(\infty)$)
Proporcional	diminui	aumenta	peq. variação	diminui
Integral	diminui	aumenta	aumenta	elimina
Derivativo	peq. variação	diminui	diminui	não muda