



## ROTEIRO DE LABORATÓRIO

1. Número da Experiência: 3
2. Título: Controle de Sistemas Dinâmicos: Sistema de Primeira Ordem
3. Objetivos: Esta prática tem como objetivos:
  - Introdução à utilização de microcomputadores para controle de sistemas dinâmicos;
  - Conceituação das ações de controle proporcional (P), integral (I) e derivativa (D);
  - Implementação de controladores P, PI, PD, PID e PI-D.
4. Equipamento Utilizado: São necessários para realização desta experiência:
  - Um microcomputador PC com um compilador C++;
  - Uma placa de aquisição de dados MultQ da Quanser;
  - Um módulo de potência UP-15-03;
  - Um sistema de tanques acoplados da Quanser;
5. Introdução:

### 5.1. Ações de Controle

#### a) Controle Proporcional (P)

$$u(t) = K_p e(t) ;$$

$$U(s) = K_p E(s)$$

onde:  $e(t) = r(t) - y(t) = SP - PV$

- O controlador proporcional é um amplificador, com ganho ajustável (K);
- O aumento do ganho K, diminui o erro de regime;
- Em geral, o aumento de K torna o sistema mais oscilatório, podendo instabilizá-lo;
- Melhora o regime e piora o transitório, sendo bastante limitado.

## **b) Controlador Proporcional + Integral (PI)**

A ação integral do controlador move a variável de controle (CS) baseada na integral no tempo do erro

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(\tau) d\tau ; \quad \boxed{U(s) = \frac{(K_p s + K_i)}{s} E(s)}$$

onde  $K_i = \frac{1}{t_i}$  e  $t_i$  é o tempo integrativo ou tempo de reset com unidade da ordem de minutos.

- Zera o erro de regime, pois aumenta o tipo do sistema em 1 unidade;
- É utilizado quando temos resposta transitória aceitável e resposta em regime insatisfatória;
- Adiciona um pólo em  $p = 0$  e um zero em  $z = -K_i/K_p$ ;
- Como aumenta a ordem do sistema, temos possibilidade de instabilidade diferente do sistema original. Pode degradar o desempenho do controlador em malha fechada.

## **c) Controlador Proporcional + Derivativo (PD)**

$$u(t) = K_p e(t) + t_d \frac{d}{dt} e(t) ; \quad \boxed{U(s) = (K_p + K_d s) E(s)}$$

onde  $K_d = t_d$  é a constante derivativa em minutos.

- Leva em conta a taxa de variação do erro;
- É utilizado quando temos resposta em regime aceitável e resposta transitória insatisfatória;
- Adiciona um zero em  $z = -K_p/K_d$ ;
- Introduce um efeito de antecipação no sistema, fazendo com que o mesmo reaja não somente à magnitude do sinal de erro, como também à sua tendência para o instante futuro, iniciando, assim, uma ação corretiva mais cedo;
- A ação derivativa tem a desvantagem de amplificar os sinais de ruído, o que pode causar um efeito de saturação nos atuadores do sistema.

## **d) Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)**

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + t_d \frac{d}{dt} e(t) ; \quad \boxed{U(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \Rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}}$$

- É utilizado quando temos resposta transitória e em regime insatisfatórias simultaneamente;
- Adiciona um pólo em  $p=0$  e 2 zeros, que dependem dos parâmetros do controlador;

**e) Controlador ( Proporcional + Integral ) + Derivativo (PI-D)**

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(\mathbf{t}) d\mathbf{t} + t_d \frac{d}{dt} y(t); \quad \boxed{U(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) E(s) + K_d s Y(s)}$$

- Assim como no caso do PID, é utilizado quando temos resposta transitória e em regime insatisfatórias simultaneamente;
- O principal objetivo de se ter a ação derivativa atuando sobre a variável de processo e não sobre o erro consiste em evitar que variações da referência (*set-point*) sejam derivadas;

5.2. *Implementação Computacional das Ações de Controle*

**a) Ação Proporcional (P)**

$$P(t) = K_p e(t) \xrightarrow{\text{Laplace}} P(s) = K_p E(s) \xrightarrow{\text{Euler}} P(z) = P(s) \Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{h}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P(z) = K_p E(z) \Rightarrow P(k) = K_p e(k)$$

**b) Ação Integral (I)**

$$I(t) = K_i \int_0^t e(\mathbf{t}) d\mathbf{t} \xrightarrow{\text{Laplace}} I(s) = \frac{K_i}{s} E(s) \xrightarrow{\text{Euler}} I(z) = I(s) \Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{h}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I(z) = z^{-1} I(z) + (K_i \cdot h \cdot E(z)) \Rightarrow I(k) = I(k-1) + (K_i \cdot h \cdot e(k))$$

**c) Ação Derivativa (D)**

$$D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \xrightarrow{\text{Laplace}} D(s) = s K_d E(s) \xrightarrow{\text{Euler}} D(z) = D(s) \Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{h}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow D(z) = K_d \frac{(1-z^{-1})E(z)}{h} \Rightarrow D(k) = K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{h}$$

6. Desenvolvimento:

1º. Elabore um programa para efetuar o controle em malha fechada do sistema de tanques de primeira ordem (configuração 1). O programa deve:

- a) Apresentar uma interface amigável, contendo menus auto explicativos e apresentando informações importantes sobre as principais variáveis envolvidas, se possível utilizando gráficos;
- b) Possibilitar que o usuário escolha um dentre os seguinte tipos de controladores: P, PD ou PI, PID ou PI-D;
  - Qualquer que seja a escolha, o programa deverá solicitar um valor para o ganho proporcional;
  - No caso de optar pelo controle PD o usuário poderá optar por fornecer o tempo derivativo ou diretamente o ganho derivativo;
  - No caso de optar pelo controle PI o usuário poderá optar por fornecer o tempo integral ou diretamente o ganho integral.
  - No caso de optar pelo controle PID ou PI-D o usuário poderá optar por fornecer os tempos integral e derivativo ou diretamente os ganhos integral e derivativo.

*Obs.: O usuário deve poder alterar os parâmetros dos controladores com o programa em execução.*

- c) Receber como entrada um valor de nível em centímetros (0 à 25cm). (*O usuário deve poder alterar também este valor, a qualquer momento, durante a execução do programa, sem que seja necessário interrompê-lo*);
- d) Fazer a leitura do sensor de nível do tanque 1, através da placa A/D;
- e) Compara o valor lido com a referência, gerando um valor de erro que será a entrada do controlador (sinal de controle);
- f) Limitar a entrada da planta (sinal de controle) em +/- 3 volts e enviá-lo para a bomba através da placa D/A.

2º. Verifique e descreva em seu relatório a diferença no comportamento do sistema com cada um dos controladores.

3º. Para cada tipo de controlador, verifique e descreva em seu relatório o comportamento do sistema para diferentes valores dos ganhos.

4º. O ajuste do(s) ganho(s) de um controlador para adequar a resposta do sistema a um padrão desejado (especificações de desempenho) é chamado de sintonia. Com base na experiência adquirida no desenvolvimento das atividades anteriores, o que pode ser dito sobre sintonia de controladores.