



## ROTEIRO DE LABORATÓRIO

1. Número da Experiência: 02
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:
  - Dois microcomputadores PC (um servidor e um cliente);
  - Uma placa de aquisição de dados MultQ3 da Quanser;
  - Um módulo de potência VoltPAQ-X1;
  - 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

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

onde  $K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$  e  $\tau_i$  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)**

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

onde  $K_d = K_p \cdot \tau_d$  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  $z = -K_p/K_d$ ;
- Introduz 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)**

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

- 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)**

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

- 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)**

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

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

**b) Ação Integral (I)**

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

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

**c) Ação Derivativa (D)**

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

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

6. Desenvolvimento:

1º. Acrescente ao programa desenvolvido na primeira experiência, na opção **MALHA FECHADA**, as seguintes funcionalidades:

- a) Possibilitar que o usuário escolha um dentre os seguintes 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.1: O usuário deve poder alterar os parâmetros dos controladores com o programa em execução.*

*Obs.:2: Para realizar as atividades relacionadas ao sistema de primeira ordem, o usuário deverá escolher o nível do tanque 1 como PV. Isto é, a porta (Saídas analógicas de 0 a 7) onde será lido o sinal usado para fazer a realimentação deverá ser a porta onde estará conectado o sensor de nível do tanque 1.*

*Obs.3: Para realizar o controle em malha fechada, o sinal de controle (MV) calculado, antes de ser escrito na porta selecionada, deverá ser limitado dentro da faixa de +/-4 volts respeitando os limites operacionais do atuador (bomba) do sistema de tanques.*

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.