



ROTEIRO DE LABORATÓRIO

1. Código da Experiência: 02B
2. Título: Controle PID de Sistemas Dinâmicos: Sistema de Segunda Ordem
3. Objetivos: Esta prática tem como objetivos:
 - O aprimoramento das habilidades na utilização de microcomputadores para controle de sistemas;
 - O reforço da conceituação das ações de controle proporcional (P), integral (I) e derivativa (D);
 - Implementação de controladores P, PI, PD e PID em sistemas de segunda ordem.
4. Equipamento Utilizado: São necessários para realização desta experiência:
 - Qualquer microcomputador com qualquer software, ou softwares, capaz de realizar a simulação dinâmica de um sistema de tanques acoplados.
5. Introdução:

Um sistema de segunda ordem ideal apresenta dois polos e nenhum zero, podendo apresentar oscilações em sua resposta. Controlar sistemas assim pode ser bem mais desafiador que controlar sistema de primeira ordem, sendo fundamental que se realize uma boa análise dinâmica antes da sintonia do controlador.

5.1. *Sistemas de Segunda Ordem*

Considere a seguinte equação diferencial de segunda ordem:

$$a\ddot{c}(t) + b\dot{c}(t) + dc(t) = er(t)$$

Definindo: $\frac{b}{a} = 2\xi\omega_n$; $\frac{d}{a} = \omega_n^2$; $\frac{e}{a} = K$

onde ξ é o fator de amortecimento, ω_n é a frequência natural e K é o ganho do sistema, temos:

$$\ddot{c}(t) + 2\xi\omega_n\dot{c}(t) + \omega_n^2c(t) = Kr(t)$$

Aplicando Laplace com C.I. nulas:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Considerando $K = \omega_n^2$:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Polos do sistema:

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \Rightarrow s = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}$$

Exemplos de sistemas de 2ª ordem: circuito RLC, sistema massa-mola-atrito, servomecanismo de posição...

Temos três casos:

- a) $0 < \xi < 1$: Caso SUBAMORTECIDO. O sistema tem dois polos complexos conjugados e apresenta oscilações;
- b) $\xi = 1$: Caso CRITICAMENTE AMORTECIDO. Dois polos reais e iguais. A partir deste valor de ξ o sistema passa a não ter mais oscilações;
- c) $\xi > 1$: Caso SOBREAMORTECIDO. Dois polos reais e distintos. A medida que ξ aumenta, o comportamento do sistema se aproxima do comportamento de um sistema de 1ª ordem.

Resposta ao Degrau Unitário

a) Caso Subamortecido:

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \operatorname{sen} \left(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right)$$

onde: $\omega_d = \sqrt{1-\xi^2}$ é a frequência natural amortecida.

Se $\xi = 0$, então: $c(t) = 1 - \cos \omega_n t$

b) Caso criticamente amortecido:

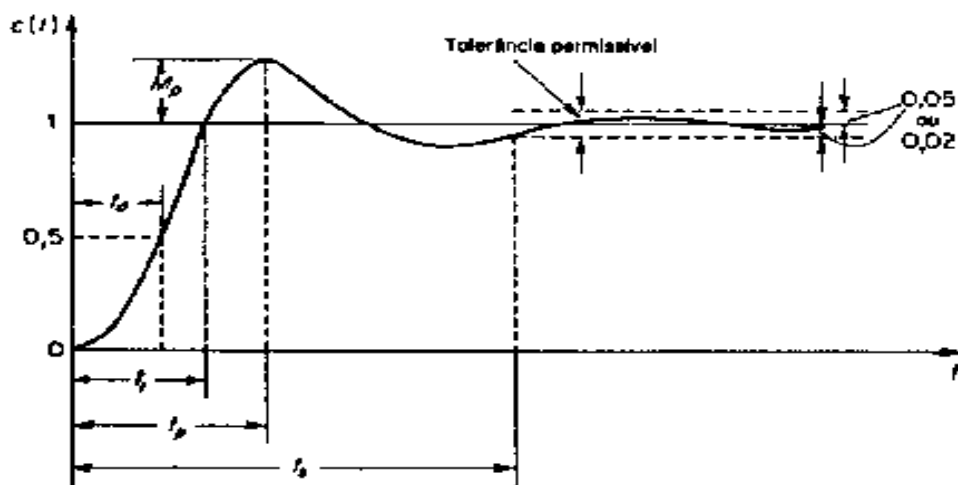
$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)$$

c) Caso sobreamortecido:

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2-1}} \left(\frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right)$$

onde $s_1 = (\xi + \sqrt{\xi^2-1})\omega_n$ e $s_2 = (\xi - \sqrt{\xi^2-1})\omega_n$

Especificações de Resposta Transitória



Definições

a) Tempo de Subida, t_r : É o tempo necessário para que a saída atinja pela primeira vez o seu valor final

$$\boxed{t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d}}; \quad \text{onde } \beta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$$

b) Tempo de Pico, t_p : É o instante de tempo em que a resposta atinge o primeiro pico do sobressinal.

$$\boxed{t_p = \frac{\pi}{\omega_d}}$$

c) Máximo Sobressinal (*Overshoot*), M_p : É o valor máximo de pico da curva de resposta medido a partir do valor final.

$$M_p(\%) = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

$$c(t_p) = 1 + e^{-\left(\xi\pi / \sqrt{1-\xi^2}\right)}$$

logo:

$$\boxed{M_p(\%) = 100e^{-\left(\xi\pi / \sqrt{1-\xi^2}\right)}}$$

OBS: O sobre-sinal máximo depende somente do valor do coeficiente de amortecimento ξ .

d) Tempo de Acomodação (estabilização), t_s : É o tempo necessário para que a resposta alcance e permaneça dentro de uma faixa em torno do valor final. Esta faixa é especificada por uma porcentagem absoluta do valor final (2% ou 5%).

$$\boxed{t_s = \frac{4}{\xi\omega_n}} \quad (\text{critério de 2\%})$$

$$\boxed{t_s = \frac{3}{\xi\omega_n}} \quad (\text{critério de 5\%})$$

OBS: As curvas e especificações calculadas são válidas somente para sistemas de 2ª ordem ideal, cuja função de transferência apresenta dois polos e nenhum zero.

$$\boxed{\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}}$$

5.2. Sistemas de Segurança Instrumentados ou Intertravamentos

Intertravamento é definido como sendo o conjunto de passos, ou laços, na lógica de automação e controle, que devem existir para garantir a segurança de um equipamento, pessoa ou processo. Geralmente, se utilizam travas lógicas (softwares de automação e controle) ou físicas (equipamentos de segurança) para garantir esta segurança.

Tais Sistemas são utilizados para monitorar as condições de certos valores e parâmetros de uma planta mantendo-os dentro dos limites operacionais e quando forem identificadas condições de riscos devem gerar alarmes e, se possível, colocar, automaticamente, a planta em uma condição segura ou mesmo realizar um desligamento de segurança (*shutdown*) de todo o processo, ou parte dele. O objetivo principal é evitar acidentes, danos aos equipamentos, proteção da produção e da propriedade e mais do que isto, evitar riscos de vida ou danos à saúde pessoal. Deve-se ter de forma clara que nenhum sistema é totalmente imune a falhas, porém sempre deve proporcionar, mesmo em caso de falha, uma condição segura.

Um sistema que garanta a operação segura do sistema de tanques acoplados deve levar em consideração, pelo menos, as seguintes regras:

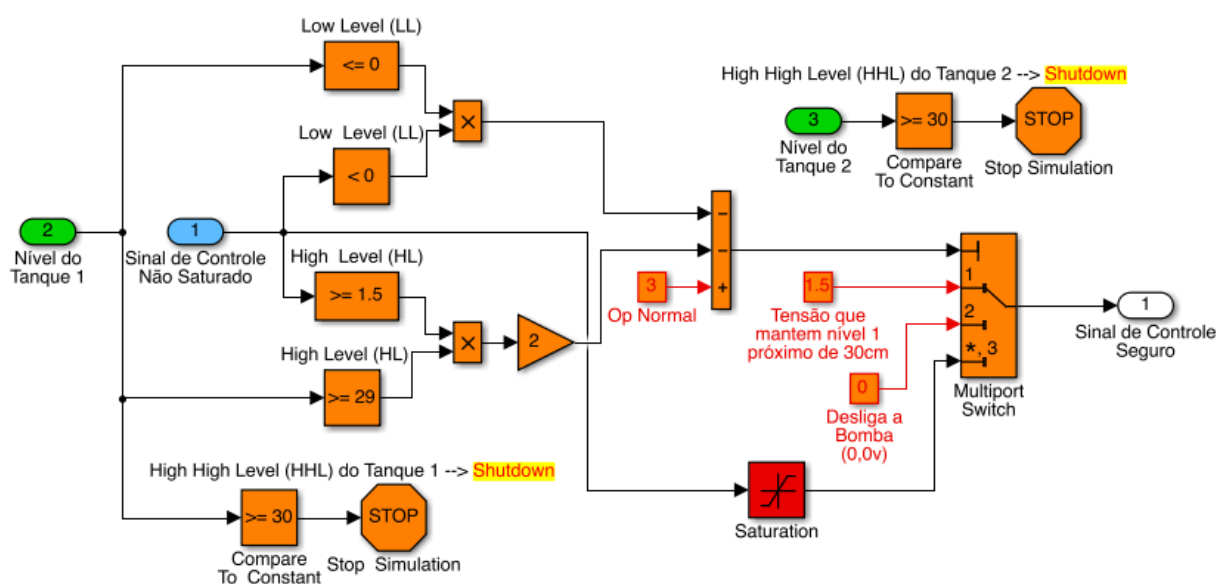
- Não deve ser enviada para o sistema uma tensão fora dos limites de ± 4 volts;
- A bomba não pode tentar sorver água (receber uma tensão negativa) quando o nível de líquido no tanque 1 estiver muito baixo (próximo de 0,00 cm ou abaixo da ponta da mangueira de alimentação);
- Nenhum dos dois tanques pode transbordar.

Obs.1: Em operação normal, com orifício médio na saída de ambos os tanques, o tanque 2 não transborda se o tanque 1 não encher além dos 30cm.

Obs.2: Existe um valor específico de tensão que mantém, em regime, o nível do tanque 1 em cada valor de altura desejado.

Obs.3: O desligamento de segurança (shutdown) só deve ocorrer quando detectado uma condição anormal de operação.

Uma possível lógica de intertravamentos pode ser vista no diagrama de blocos da seguinte figura:



6. Desenvolvimento:

- Implemente um controlador PID para o nível do tanque 2.

Obs.1: Implementar o controlador PID utilizando blocos/operações básicas, tais como: multiplicação, soma, integração e derivação. NÃO UTILIZAR BLOCOS OU FUNÇÕES “PID” PRONTAS.

Obs.2: Para realizar o controle em malha fechada do nível do tanque 2, o sinal de controle (MV) calculado, antes de ser enviado para planta, deverá passar por um bloco de intertravamentos (conforme apresentado na introdução).

1. Inicialmente teste apenas a ação proporcional (controladores P), com diferentes valores de ganho.
2. Em seguida, sempre todos os ganhos envolvidos:
 - 2.1. Teste controladores PI;
 - 2.2. Teste controladores PD;
 - 2.3. Teste controladores PID;
 - 2.4. Teste o filtro na ação derivativa;
 - 2.5. Teste o filtro anti-reset-windup.
3. Descreva em seu relatório a diferença no comportamento do sistema com cada uma das leis de controle testadas. Exemplifique com curvas de resposta do sistema e de sinais de controle.
4. Para cada lei de controle, verifique e descreva em seu relatório o comportamento do sistema para diferentes valores dos ganhos. Exemplifique com curvas de resposta do sistema e de sinais de controle.
5. Comente sobre as semelhanças e diferenças observadas ao se realizarem os testes no sistema de primeira ordem e no sistema de segunda ordem.