



Projeto e Implementação de um Módulo Didático para Controle PID de Processos Industriais: Estudo de Caso Aplicado a um Sistema de Nível de Líquido

Allan Martins¹, Jéssica Aguiar¹, Paulo Henrique Melo¹, Ginalber Serra²

¹Bolsistas de Iniciação Científica

²Orientador (Prof. Dr. Bolsista de Produtividade em Pesquisa)

Resumo: Este artigo apresenta o projeto e a implementação de um módulo didático de um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), que visa controlar um sistema de nível de líquido. Para a validação do módulo didático foi utilizada uma planta elétrica análoga ao sistema de nível de líquido, obtida através da equivalência feita entre as funções de transferência das plantas físicas e elétrica. A metodologia proposta para projetar o controlador PID foi método da alocação de pólos. Os resultados de simulação e experimentais evidenciam a eficiência do módulo didático desenvolvido no sentido de sua aplicabilidade no controle de algum processo industrial.

Palavra-chave: controle PID, módulo didático, alocação de pólos, nível de líquido

1. INTRODUÇÃO

O controlador PID é o mais utilizado em malhas de controle de processos industriais. Isto não se limita ao fato do mesmo apresentar uma estrutura simples e de fácil entendimento, mas também pelo fato de sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle, pois o controle PID se torna mais adequado quando métodos de projetos analíticos não podem ser utilizados em plantas industriais [1][5].

Devido à vasta utilização do PID e por se mostrar o mais prático e eficiente dos controladores no que se refere aos problemas de controle industrial [2][4][6], neste projeto foi proposto a criação de um módulo didático de controle PID de baixo custo, possibilitando demonstrar as principais características deste controlador nas indústrias de grande porte da atualidade. Tendo por proposta um módulo didático que será utilizado em aulas experimentais com alunos do nível técnico e superior, visa-se possibilitar maior assimilação dos principais aspectos da análise e projeto de sistemas de controle PID em malha fechada, relacionando-os ao ambiente industrial [7][3].

Com o intuito de se projetar o módulo didático de controle PID foram utilizados os ambientes MATLAB e MULTISIM para testes tanto do controlador quanto do circuito elétrico análogo ao sistema de nível de líquido. Após simulações em tais ambientes, fez-se a implementação do módulo que foi validado por meio da verificação dos resultados de sua ação de controle.

2. PROJETO DE CONTROLE PID POR ALOCAÇÃO DE PÓLOS

O propósito de se projetar um controlador PID é determinar os parâmetros do controlador de modo que, a função de transferência em malha fechada, seja estável.

Assim, conforme as propriedades de associação de sistemas têm-se a seguinte função de transferência do sistema de controle PID em malha fechada:

$$M(s) = \frac{C_s G(s)}{1 + C_s G(s)} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde,

- $M(s)$ - Função de transferência em Malha fechada;
- C_s - Função de transferência do Controlador;
- $G(s)$ - Função de transferência da Planta industrial.



A estrutura geral, em termos de diagrama de blocos, de um sistema de controle PID é mostrada na Figura 1.

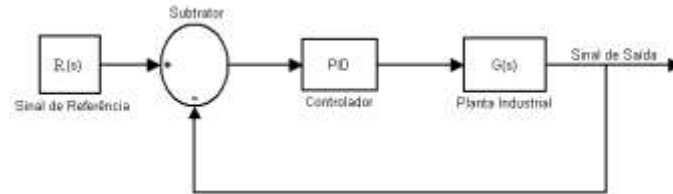


Figura 1 - Diagrama de blocos de um sistema de controle PID

Neste diagrama, sem perda de generalidade, a planta a ser controlada apresenta a seguinte função de transferência:

$$G_s = \frac{K_g}{a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (\text{eq.2})$$

A estrutura do controlador é dada por:

$$U_s = K_p E_s + \frac{K_i}{s} E_s + K_d E_s s$$

$$C(s) = \frac{U_s}{E_s} = \frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde

- E_s - Sinal de erro
- K_p - Ganho proporcional
- K_i - Ganho integral
- K_d - Ganho derivativo
- U_s - Sinal de controle
- C_s - Função de transferência do Controlador

Considerando-se, então, as funções de transferência da planta (eq.2) e do controlador (eq.3), a função de transferência do sistema de controle em malha fechada (eq. 1), é dada por:

$$M(s) = \frac{K_g K_d s^2 + K_g K_p s + K_g K_i}{a_1 s^3 + (a_2 + K_g K_d) s^2 + a_3 + K_g K_p s + K_g K_i} \quad (\text{eq. 4})$$

O denominador da função de transferência do sistema de controle em malha-fechada (eq. 4) é chamado de equação característica, consistindo em um polinômio, em “s”, a partir do qual é possível analisar a estabilidade do sistema. Para que ocorra a estabilidade do sistema, todas as partes reais das raízes (pólos) da equação característica devem ser negativas. Se o sistema apresentar ao menos uma raiz com parte real positiva, este será instável.

Através da alocação de pólos, escolhem-se raízes de acordo com as especificações desejadas pelo projetista. Como a equação característica é de terceiro grau, escolhem-se, neste caso, três raízes s_1, s_2 e s_3 , podendo a equação característica ser escrita da seguinte forma:

$$s - s_1 \cdot s - s_2 \cdot s - s_3 = 0 \quad (\text{eq.5})$$

$$s^3 + s_1 + s_2 + s_3 s^2 + s_1 s_2 + s_1 s_3 + s_2 s_3 s + s_1 + s_2 + s_3 = 0$$

Por fim, iguala-se a equação característica do sistema de controle em malha-fechada com o polinômio (eq. 5) para encontrar os parâmetros do controlador PID. Assim, tem-se:

$$a_3 + K_g K_p = s_1 s_2 + s_1 s_3 + s_2 s_3$$

$$K_p = \frac{s_1 s_2 + s_1 s_3 + s_2 s_3 - a_3}{K_g} \quad (\text{eq. 6})$$

$$K_g K_i = s_1 s_2 s_3$$

$$K_i = \frac{s_1 s_2 s_3}{K_g} \quad (\text{eq. 7})$$

$$a_2 + K_g K_d = s_1 + s_2 + s_3$$

$$K_d = \frac{s_1 + s_2 + s_3 - a_2}{K_g} \quad (\text{eq. 8})$$

3. RESULTADOS

Para projetar o controlador PID, levou-se em consideração a análise dinâmica de um sistema de nível de líquido. Sendo o mesmo constituído por uma válvula de entrada com vazão máxima de 600 cm^3 , um reservatório tendo por medidas de altura 30 cm , comprimento de 40 cm e largura de 20 cm , com capacidade de armazenamento de 24 L , conforme mostrado na Figura 2.



Figura 2 - Reservatório

Para determinação dos valores do capacitor e da resistência de saída utilizados na planta elétrica fez-se as seguintes considerações:

$$\text{Capacidade física}(C) = \frac{\text{Variação do Líquido armazenado}(V)}{\text{Variação da altura}(H)} = 800$$

$$\text{Resistência física}(R) = \frac{\text{Variação da altura}(H)}{\text{Variação da vazão em regime permanente}(Q)} = 0.1$$

Sendo consideradas tais especificações e levando-se em conta um pequeno intervalo de tempo, encontramos a função de transferência do sistema físico, conforme os passos abaixo:

$$C dh = q_i - q_o \quad dt \quad (\text{eq. 9})$$

Onde,

- q_i - pequeno desvio da vazão entrada
- h - pequena variação de altura
- q_o - pequeno desvio da vazão de saída
- t - pequena variação de tempo

De acordo com a relação de resistência obtêm-se:

$$q_0 = \frac{h}{R} \quad (\text{eq. 10})$$

Fazendo-se as substituições e operações necessárias, encontra-se a seguinte equação:

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \quad (\text{eq. 11})$$

Aplicando-se transformada de Laplace em ambos os membros, a equação é escrita da seguinte forma:

$$RCs + 1 H s = RQ_i(s) \quad (\text{eq. 12})$$

Sendo considerado $Q_i s$ a entrada e $H s$ a saída do sistema, obtêm-se a função de transferência do sistema físico:

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{0,1}{800s \cdot 0,1 + 1} = \frac{0,1}{80s + 1} \quad (\text{eq. 13})$$

Para controle desse sistema, fez-se uma analogia do sistema físico de nível de líquido com um circuito elétrico, no qual a válvula de entrada corresponde a uma resistência, simulando a vazão máxima de entrada, o reservatório equivalente a um capacitor e a válvula de saída corresponde a uma resistência de saída, conforme disposto na Figura 3.

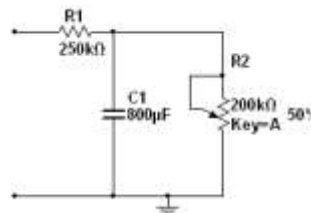


Figura 3 - Planta elétrica análoga ao sistema de nível de líquido

Depois de feito a análise do circuito, encontrou-se a função de transferência abaixo:

$$\frac{V_o}{I(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (\text{eq. 14})$$

onde,

- $I(s)$ - Corrente de entrada
- V_o - Tensão de saída

A constante de tempo RC do sistema elétrico análogo deve ser equivalente ao RC do sistema físico, para isso atribuiu-se valores ao sistema elétrico conforme as especificações do sistema físico.

Considerando o valor da resistência $100K\Omega$, encontrou-se o valor do capacitor:

$$RC = 80 \quad (\text{eq. 15})$$

$$C = \frac{80}{100K\Omega} = 800\mu F$$



Ao ser escolhido o tempo de acomodação (t_s), admitiu-se que a saída do sistema se mantivesse a cerca de 2% do valor final, já que o regime permanente é alcançado matematicamente somente depois de um tempo infinito [6].

Tendo:

$$t_s = 4\tau \quad (\text{eq. 16})$$

$$P = -\frac{1}{\tau} \quad (\text{eq. 17})$$

onde,

- τ - constante de tempo;
- P - pólo

Encontrou-se através da constante de tempo um dos pólos necessário para determinar os ganhos do sistema, que neste projeto são os ganhos proporcional (K_p) e integral (K_i).

Através do MATLAB pode-se saber o tempo de enchimento do reservatório e a altura necessária física para que o sistema entrasse em regime permanente. Colocando a função de transferência do sistema físico e as especificações de fluxo de entrada, encontrou-se o seguinte gráfico:

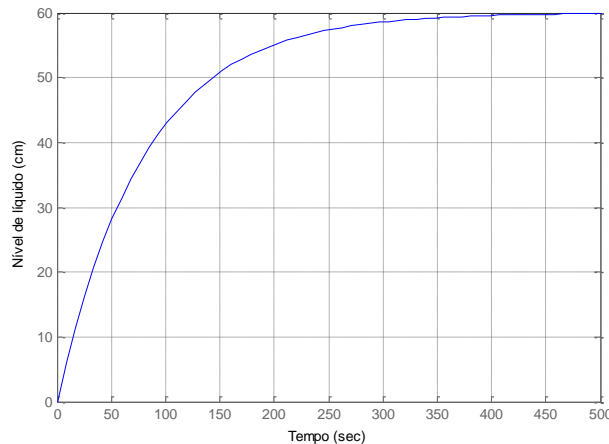


Figura 4 - Gráfico do nível de líquido obtido através do MATLAB

Sendo o tempo aproximado de acomodação (t_s) do sistema físico 350 s, seria necessário que a altura do tanque fosse de 60 cm (Figura 4) para que o sistema entrasse em regime permanente, devido a pressão exercida pela coluna de líquido. Como o tanque possui apenas 30 cm de altura, o regime permanente não seria atingido e o líquido transbordaria. O controlador PID foi utilizado para que este problema não ocorresse, fazendo com que seja mantida a altura desejada do líquido, que neste projeto é de 20 cm.

Admitindo-se $t_s = 350$ s, obteve-se a partir das equações 16 e 17, o valor de um dos pólos:

$$Pólo = -0,011$$

Considerando pólos iguais encontrou-se os valores de K_p e K_i através da substituição dos valores na equação 1 e considerando o ganho $K_d = 0$, pois foi utilizada uma planta de primeira ordem, tendo por equação final:

$$M s = \frac{(K_p s + K_i)R}{(K_p s + K_i)R + s(RCs + 1)} \quad (\text{eq. 18})$$



Sendo, $(K_p s + K_i)R + s(RC_s + 1)$ a equação característica da malha fechada de primeira ordem, esta pode ser reescrita da seguinte forma:

$$RCs^2 + RK_p + 1 s + RK_i \quad (\text{eq. 19})$$

Atribuindo valores da planta física à equação característica e fazendo a equivalência com uma equação de segundo grau, tendo por raízes $s_1 = s_2 = -0,011$, encontraram-se os valores de K_p e K_i :

$$80s^2 + 0,1K_p + 1 s + 0,1K_i = 80s^2 + \alpha s + \beta \quad (\text{eq. 20})$$

Onde,

- $\alpha = 1,76$
- $\beta = 0,009$

Atribuindo os valores a equação 20 e fazendo a respectiva equivalência, obtiveram-se os ganhos:

- $K_p = 7,6$
- $K_i = 0,09$

As faixas dos valores dos ganhos do controlador PID projetado são dadas por:

- $K_p = [0; 12,8]$
- $K_i = [0,27; 0,05]$
- $K_d = [0; 9]$

Assim, o controlador PID pode ser aplicado a qualquer planta a ser controlada, desde que os parâmetros do mesmo, resultante na etapa de projeto, esteja dentro da faixa obtida. Após serem encontrados todos os parâmetros necessários para o controlador, iniciaram-se as simulações.

Através do MULTISIM, fez-se a montagem eletrônica do projeto, como mostrada na Figura 5.

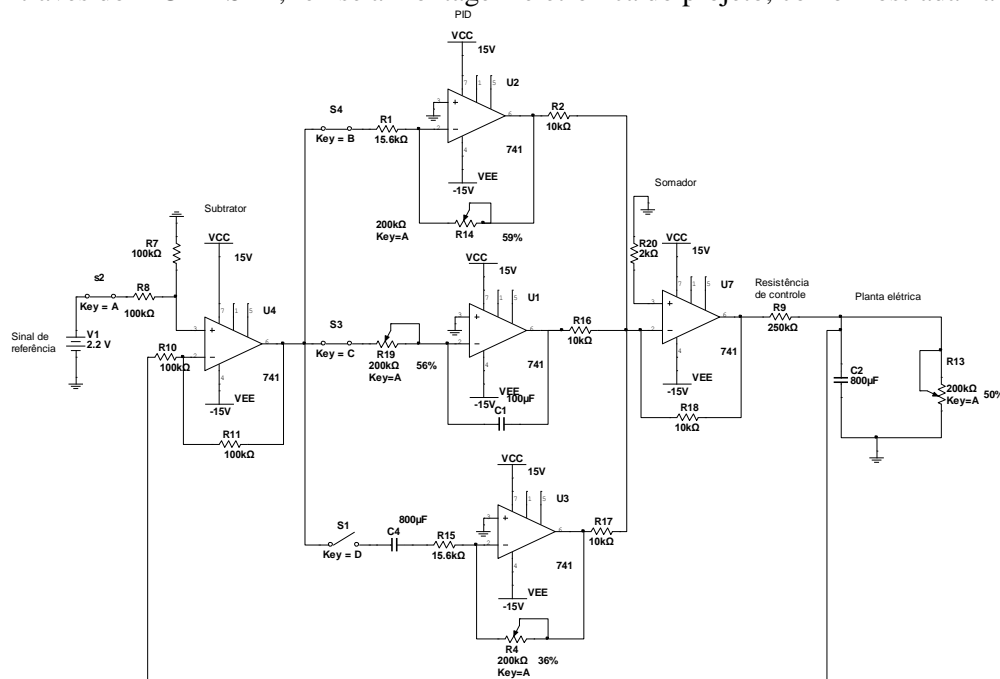


Figura 5 - Sistema de nível de líquido em malha fechada obtida através do ambiente computacional MULTISIM

Colocando as pontas de prova do osciloscópio entre o subtrator e o PID, é possível verificar o sinal de erro do sistema, que inicia em um valor próximo ao valor de referência e tende a zero, já o tempo de enchimento da planta é possível ser observado colocando o as pontas de prova do osciloscópio na entrada da planta elétrica, constatando assim, que o tempo de enchimento da planta corresponde a 32,197 s à 63% do valor de referência, conforme mostrado nas Figuras 6 e 7.

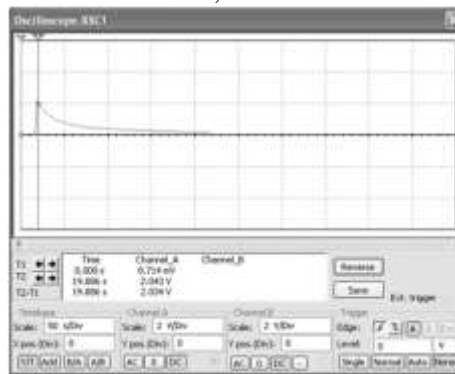


Figura 6 - Sinal de erro do PID

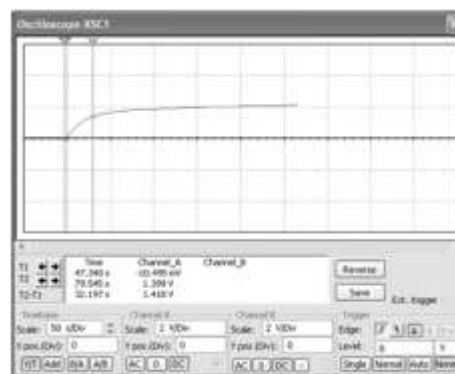


Figura 7 – Resposta do sistema de nível de líquido

Por fim, fez-se a implementação do projeto, tendo por comparação os resultados abaixo:

Tabela 1 – Comparação dos resultados obtidos através de testes realizados nos ambientes computacionais MATLAB e MULTISIM com os resultados obtidos através da implementação do projeto

	Corrente de entrada em Regime	Corrente de saída em Regime	Corrente de pico	Pico aproximado de erro do PID	Tempo de acomodação	Tempo de enchimento
MATLAB	-	-	-	-	350 s	32,5 s
MULTISIM	32,91 μ A	32,91 μ A	56,040 μ A	2,034V	371 s	32,197 s
PROJETO	31,2 μ A	31,2 μ A	55,5 μ A	2,1V	400 s	30 s

Depois de feito as comparações, foi possível observar que o módulo didático de controle PID funciona de acordo com o esperado sendo validado por um circuito elétrico de primeira ordem análogo a um sistema de nível de líquido.



5. CONCLUSÃO

O módulo didático de controle PID foi validado por um circuito elétrico de primeira ordem análogo a um sistema de nível de líquido.

Encontrou-se os valores práticos obtidos através da implementação do módulo didático correspondentes aos valores teóricos encontrados em simulações nos ambientes computacionais MATLAB e MULTISIM.

O módulo didático de baixo custo pode ser aplicado em diferentes plantas, desde que os ganhos necessários para o mesmo esteja dentro da faixa de ganhos especificados.

Pretende-se aplicar o módulo de controle PID em um sistema físico térmico.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMA pelo fomento desta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aström, K. J.; Hänggglund, T. (1995). PID Controllers Theory Design and Tuning. 2nd Edition. Instrument Society of America, 1995.
- [2] BOLTON W. **Engenharia de Controle**. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1995.
- [3] DAVIS, Claudia. OLIVEIRA, Zilma. **Psicologia na educação**. São Paulo: Cortez, 1993.
- [4] Jhon Park; Steve Mackeay. **Practical Data Acquisition for instrumentation and Control systems**. IDC technology, 2010.
- [5] MORAES, C.C., CASTRUCCI, P.L. **Engenharia de Automação Industrial**, LTC –Livros Técnicos e Científicos, 2ª Ed., São Paulo, 2007.
- [6] Nise, N. S. Engenharia de Sistemas de controle. 3ª Edição. São Paulo, 2002.
- [7] PENA, R.T., JOTA, F.G., SEIXAS-FILHO, C. **A New Undergraduate Degree in Control Engineering**, **IEEE Transactions on Education**, Vol. 44, N° 04, 399-405, Nov, 2001.