



ROTEIRO DE LABORATÓRIO

1. Código da Experiência: 2A
2. Título: Controle PID 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 e PID, incluindo filtro na ação derivativa e anti-reset-windup.
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:

A introdução de um controlador em um determinado sistema visa a modificação de sua dinâmica, manipulando a relação entrada/saída através da atuação sobre um ou mais dos seus parâmetros, com o objetivo de satisfazer certas especificações com relação a sua resposta (Ogata, 1993). Geralmente, existe uma ou mais variáveis que sofrem uma ação direta do controlador, denominadas variáveis manipuladas (MV, do inglês *Manipulated Variable*), alterando o comportamento do sistema para que sua resposta sofra as mudanças necessárias para satisfazer as especificações desejadas. As variáveis de saída, que correspondem à resposta do sistema, são denominadas variáveis controladas ou, no caso do controle de processos, variáveis de processo (PV, do inglês *Process Variable*).

Para introduzirmos controladores em sistemas ou processos, do ponto de vista de equipamentos, precisamos de um dispositivo físico, podendo ser: eletrônico, elétrico, mecânico, pneumático, hidráulico ou combinações destes. Atualmente, os equipamentos utilizados para implementação de controladores são, predominantemente, eletrônicos, devido à facilidade de tratamento e manipulação dos sinais envolvidos neste tipo de equipamento. Circuitos eletrônicos, especialmente aqueles que contém microcontroladores ou microprocessadores, têm sido vastamente utilizados para implementação de leis de controle. Em aplicações industriais, os CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) são o equipamento mais frequentemente utilizado.

Contudo, quando utilizamos sistemas eletrônicos microcontrolados (ou microprocessados), além do equipamento físico em si, também precisamos programar o equipamento. Uma rotina, que implementa o algoritmo responsável por realizar os cálculos necessários para determinar como a variável manipulada deve ser alterada para que a resposta do sistema atenda às especificações de desempenho, comumente chamada de **Lei de Controle**, é parte fundamental do controlador.

Muitas vezes, principalmente em grandes empresas, pessoas diferentes são responsáveis pela instalação física dos equipamentos e pela implementação lógica da lei de controle. Normalmente, cabe ao engenheiro de controle a determinação das estratégias de controle a serem usadas, bem como a proposição da lei de controle, incluindo o ajuste de seus parâmetros. Por isso mesmo, do ponto de vista do engenheiro de controle, ao se falar de controlador estamos nos referindo, frequentemente, às equações que definem a lei de controle.

Neste contexto o controlador, ou lei de controle, mais utilizado em todo o mundo é aquele chamado de PID. Trata-se de um controlador que pode ser formado por diferentes combinação de 3 diferentes ações de controle: Ação Proporcional, Ação Integral (ou Integrativa) e Ação Derivativa.

5.1. Ações de Controle

O controlador PID, na realidade, pode ser visto como sendo uma família de controladores. As 3 ações de controle podem ser combinadas de diferentes maneiras, formando controladores que podem receber diferentes nomes, como: P, PI, PD e PID, conforme as ações de controle são, ou não, utilizadas.

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

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right);$$

$$U(s) = \frac{(K_p s + K_i)}{s} E(s)$$

sendo: $K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$, em que: τ_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 $z = -K_i/K_p = -1/\tau_i$;
- 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)

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \tau_d \frac{d}{dt} e(t) \right);$$

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

Sendo: $K_d = K_p \tau_d$ a constante derivativa, dada 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 $z = -K_p/K_d = -1/\tau_d$;
- 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)

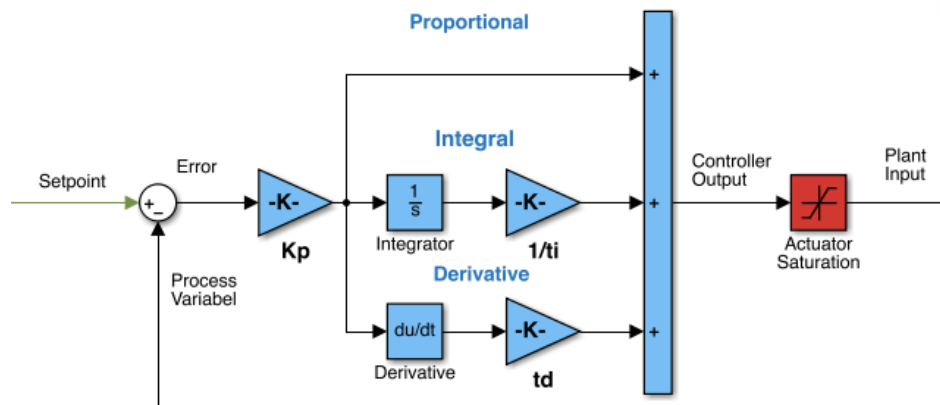
$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + \tau_d \frac{d}{dt} e(t) \right); \quad U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \Rightarrow \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

- 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;

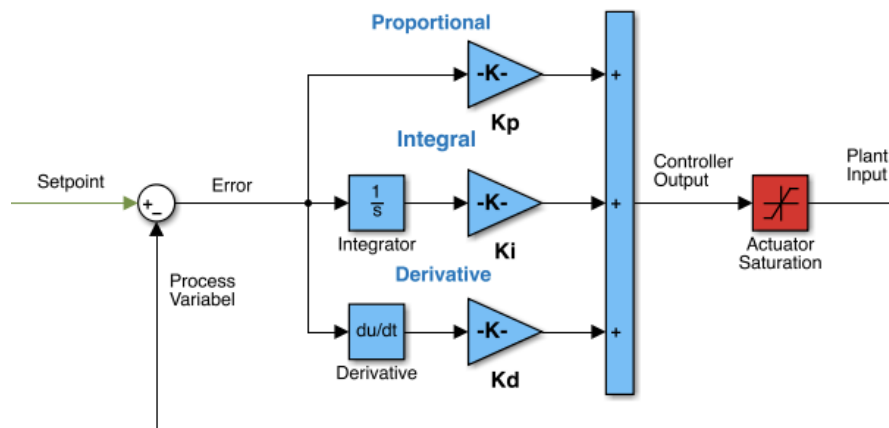
5.2. Implementação do Controlador PID

Diferentes equipamentos, de diferentes fabricantes, podem apresentar pequenas variações quanto à implementação do controlador PID. As duas implementações mais comumente utilizadas são: **Ideal** e **Paralelo**.

- **Ideal (ou Série, ou Serial)**



- **Paralelo**

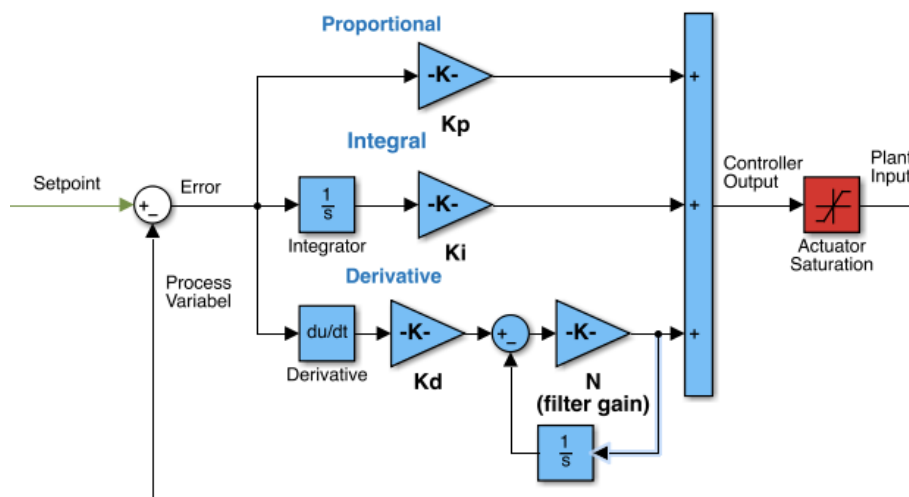


5.3. *Modificações das Ações de Controle PID*

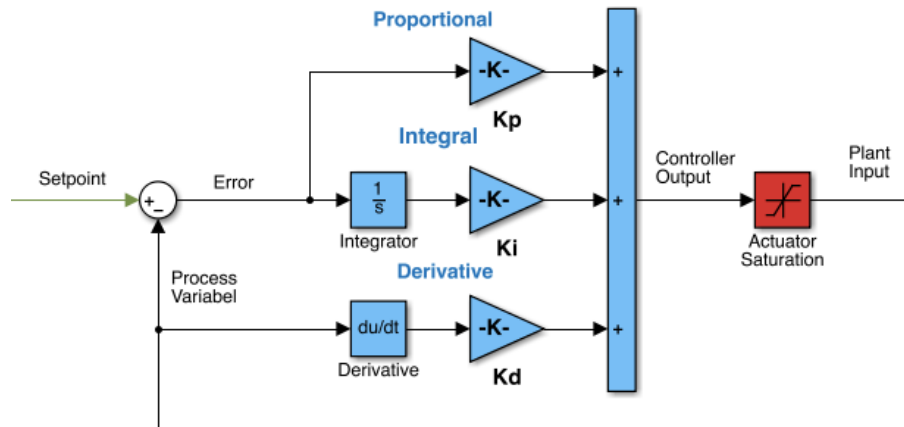
Existem também diversas modificações, que poderão ser necessárias em cada implementação, dependendo de características do sistema que estiver sendo controlado, das condições de operação as quais o sistema será submetido e, até mesmo, do equipamento que será utilizado para implementação do controlador.

a) Modificação na Ação Derivativa

- **Filtro da Ação Derivativa**

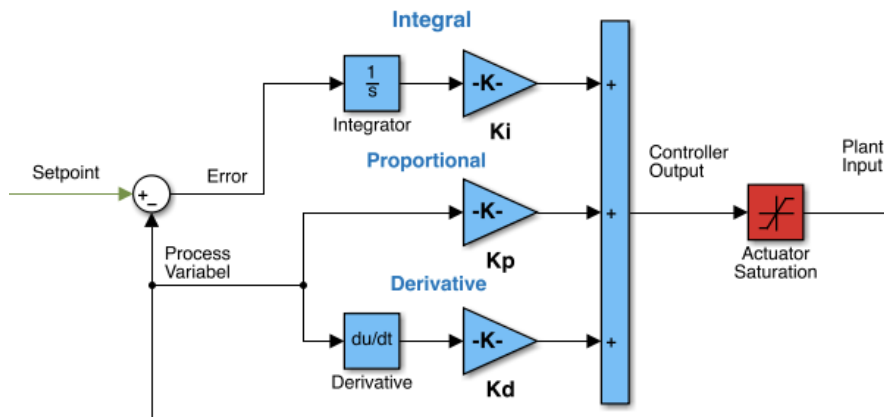


- **PI-D**



Objetivo: Não derivar variações bruscas no sinal de referência

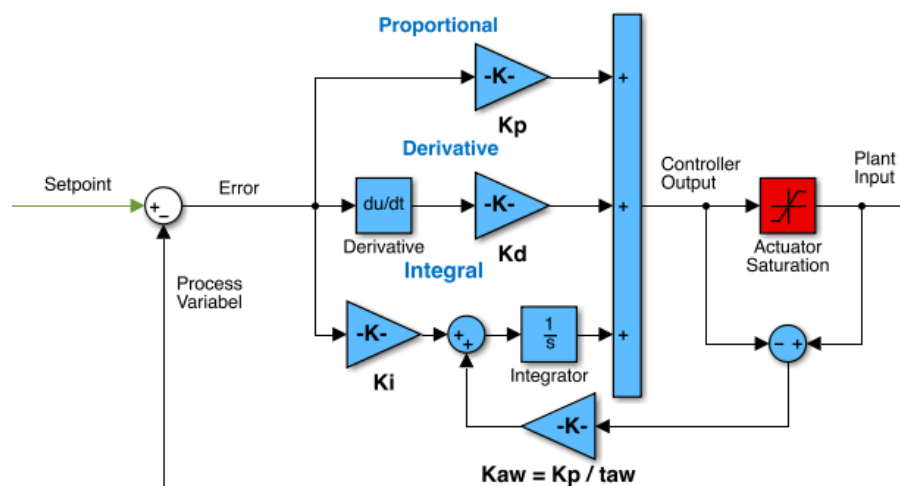
- **I-PD**



Objetivo: Não derivar, nem amplificar variações bruscas no sinal de referência.

b) Modificação na Ação Integrativa

- **Filtro Anti-WindUp (Anti-Reset Windup)**



6. Desenvolvimento:

- Implemente um controlador PID para o nível do tanque 1.

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, o sinal de controle (MV) calculado, antes de ser enviado para planta, deverá ser limitado (saturado) em ± 4 volts, respeitando os limites operacionais do atuador (bomba) do sistema de tanques.

1. Inicialmente implemente apenas a ação proporcional, formando controladores P, e realize testes com diferentes valores de ganho.
2. Em seguida, sempre realizando novos teste a cada etapa:
 - 2.1. Implemente a ação integrativa, formando controladores PI;
 - 2.2. Implemente a ação derivativa, permitindo agora formar controladores PD e PID;
 - 2.3. Implemente o filtro na ação derivativa;
 - 2.4. Implemente o filtro anti-reset-windup.
3. Descreva em seu relatório a diferença no comportamento do sistema com cada uma das leis de controle implementados. Exemplifique com curvas de resposta do sistema e de sinais de controle, tanto para entradas degrau, quanto para entradas senoidais.
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, tanto para entradas degrau, quanto para entradas senoidais.