

# 1 Introdução

O presente simulador tem por objetivo mostrar o comportamento em malha fechada de um sistema de controle composto por um processo com dinâmica de 1° ordem e um controlador PI (Proporcional Integral). Neste simulador o PI é implementado com Anti-Windup.

## 2 Modelo do processo e simulação discreta

A equação 1 mostra o modelo usado para simular o processo no domínio do tempo contínuo, sendo  $y$  a saída do processo;  $u$  o sinal de atuação e  $q$  uma perturbação externa que atua no processo. Os parâmetros do modelo são  $\tau$ , a constante de tempo;  $K_e$ , o ganho estático relativo ao controle;  $K_q$ , o ganho estático relativo à perturbação e  $L$ , o atraso.

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_e \cdot u(t - L) + K_q \cdot q(t - L) \quad (1)$$

Para a simulação em tempo discreto do processo, se usa um modelo discreto equivalente do mesmo, que se mostra na equação 2, e que pode ser obtida admitindo:

$$\frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(k) - y(k - 1)}{t_s}$$

com  $t_s$ , o período de amostragem:

$$y(k + 1) = a \cdot y(k) + b \cdot u(k - l) + c \cdot q(k - l). \quad (2)$$

Nesta equação,  $l$  é o número de amostras de atraso e os parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $c$  podem ser obtidos em função de  $\tau$ ,  $K_e$ ,  $K_q$  e  $t_s$ .

### 3 Equações do controlador

Neste simulador consideramos um controlador proporcional-integral com um sinal de referência ( $sp$ ), uma constante de proporcionalidade,  $K_p$ , uma constante de integração,  $K_i$ , um tempo de amostragem  $t_s$ , além dos limite do atuador,  $U_{min}$  e  $U_{max}$ . As equações usadas para implementar o controlador PI sem a ação Anti-Windup são:

$$e(k) = sp(k) - y(k)$$

$$u_p(k) = K_p \cdot e(k)$$

$$u_i(k) = u_i(k-1) + K_i \cdot t_s \cdot e(k)$$

$$u(k) = u_p(k) + u_i(k)$$

Para que seja implementado o efeito de Anti-Windup, é necessário que deixemos explícito  $u(k)$  em função de  $u(k-1)$ , segue o desenvolvimento:

$$\begin{aligned} u(k) &= u_p(k) + u_i(k-1) + K_i t_s e(k) \\ u_{(k-1)} &= u_{p(k-1)} + u_{i(k-1)} \\ u(k) - u_{(k-1)} &= [u_{p(k)} - u_{p(k-1)}] + [u_{i(k-1)} - u_{i(k-1)}] + K_i t_s e(k) \\ u(k) &= u_{(k-1)} + K_p \cdot [e(k) - e_{(k-1)}] + K_i t_s e(k) \end{aligned}$$

Assim, no controlador, podemos implementar o efeito de Anti-Windup usando a seguinte lógica (em pseudo-código):

**Controlador PI com Anti-Windup:**

$$\begin{aligned} e &\leftarrow sp - y \\ u &\leftarrow u_{ant} + K_p \cdot [e - e_{ant}] + K_i t_s e \end{aligned}$$

**se**  $u > U_{max}$  :  
     $u \leftarrow U_{max}$   
**se**  $u < U_{min}$  :  
     $u \leftarrow U_{min}$   
**fim**

$$\begin{aligned} e_{ant} &\leftarrow e \\ u_{ant} &\leftarrow u \end{aligned}$$

## 4 Interface Gráfica

A interface gráfica é dividida em algumas partes, que serão discutidas a seguir.

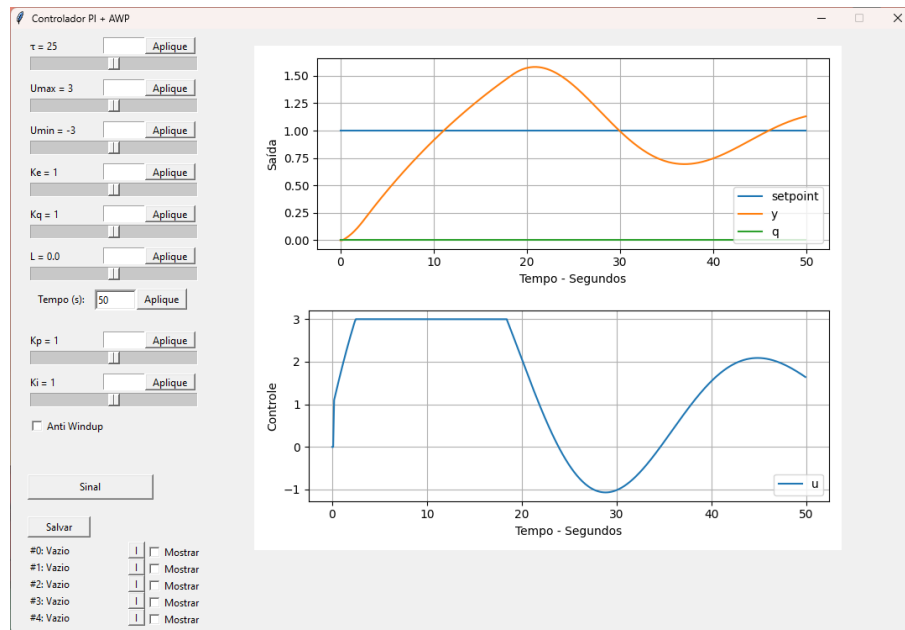


Figura 1: Painel Inicial do Simulador

## 4.1 Propriedades do Processo

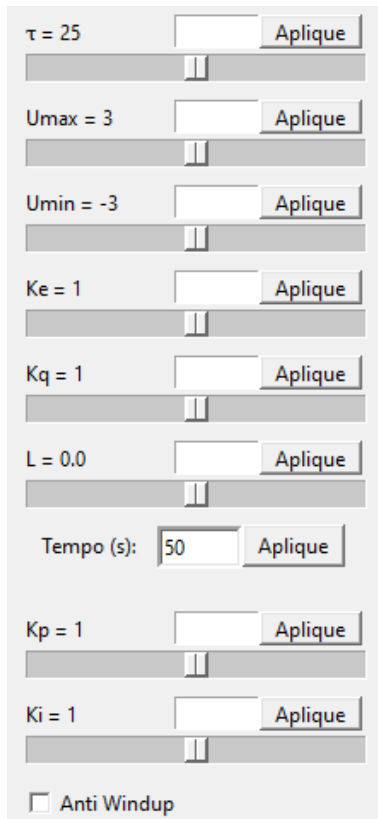


Figura 2: Controles do Processo

Nesse bloco de comandos, você pode modificar os valores da constante de tempo ( $\tau$ ), o valor máximo ( $U_{max}$ ) e mínimo ( $U_{min}$ ) que o atuador pode assumir, as constantes estáticas da atuação ( $Ke$ ) e da perturbação ( $Kq$ ), o atraso do sistema ( $L$ ), o ganho proporcional ( $Kp$ ), o ganho integrativo ( $Ki$ ) e habilitar ou não a ação *AntiWindUp* com a caixa de seleção, caso a caixa esteja desabilitada, o controlador assumirá um comportamento igual a um controlador PI (desenvolvido em outra ferramenta).

Ademais, existe uma entrada para definir qual o intervalo de tempo que a simulação irá ocorrer, note que, ao modificar a escala de tempo, **todos os gráficos salvos irão ser deletados**.

Ao clicar no botão *Sinal*, surgirá um popup para que o usuário possa desenhar formas de onda para ser usadas como setpoint, perturbação e atuação, que podem ser alterados a cada simulação, essa função será explorada no próximo subitem.

## 4.2 Sinais

Após clicar no botão *Sinal*, surgirá uma interface para que o usuário possa desenhar formas de onda. Nessa interface, você pode adicionar ruído ao sistema, definir uma forma de onda e definir como utilizá-la na simulação.

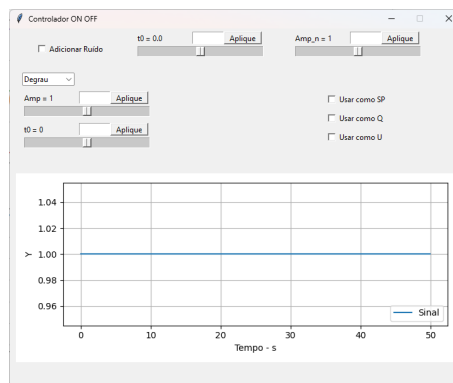


Figura 3: Sinais

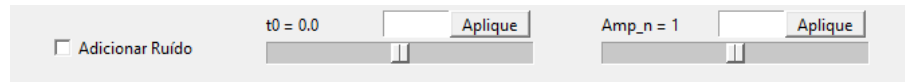


Figura 4: Ruído

Na figura 4 se mostra o painel do ruído, no qual o usuário pode decidir se irá ou não incluir ruído na simulação do processo, o que é feito através da caixa de seleção *Adicionar Ruído*. Utilizando os parâmetros  $t_0$  e  $Amp_n$ , o usuário também pode definir o momento em que a simulação começará a ter ruído e a amplitude dele, respectivamente.

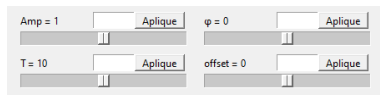


Figura 5: Forma de Onda

Utilizando a *Caixa de Seleção* é possível escolher entre 4 tipos de formas de onda: Seno, Triangular, Quadrada e Degrau. Cada uma possuindo propriedades para sua definição, permitindo a criação de diferentes ondas.

Inicialmente, nenhuma forma de onda definida será usada na simulação, para que isso ocorra é necessário que as respectivas caixas de seleção sejam clicadas:

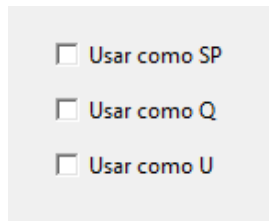


Figura 6: Caixas de seleção

- *Usar como SP*, para usar a forma de onda como setpoint;
- *Usar como Q*, para usar a forma de onda como perturbação;
- *Usar como U*, para usar como sinal de controle, desabilita o controle ON/OFF, opera em malha aberta.

### 4.3 Comparação de Resultados

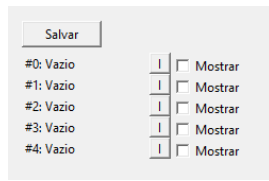


Figura 7: Respostas Salvas

O usuário também pode salvar os resultados em até 5 espaços de memória para que ele possa comparar com outras respostas no futuro. Importante: note que **as formas de onda não ficam salvas após o fechamento do programa.**

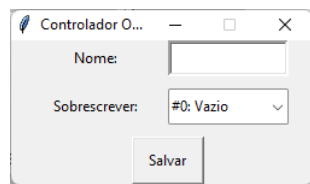


Figura 8: Popup Salvar

Ao clicar no botão *Salvar*, irá aparecer uma janela de popup, a qual irá pedir um nome para a forma de onda que o usuário vai salvar (**deixar em branco é aceito**) e em qual espaço irá salvar aquela informação, observe que a nova onda sobrescreverá a antiga.



Figura 9: Visualização

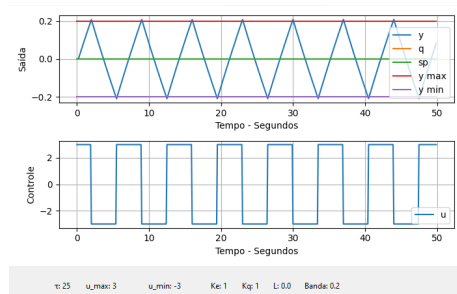


Figura 10: Popup criado ao apertar o botão I

O usuário também pode visualizar ou mostrar no gráfico as formas de onda, clicando no botão *I* ou marcando a caixa de seleção *Mostrar*, respectivamente. Ao visualizar a onda, irá abrir uma janela com as formas de onda e com as condições em que ela foi gerada.

## 4.4 Gráficos

Os gráficos irão mostrar os dados da saída, da perturbação e do sinal de atuação gerados pela simulações e os dados salvos que o usuário desejar mostrar.

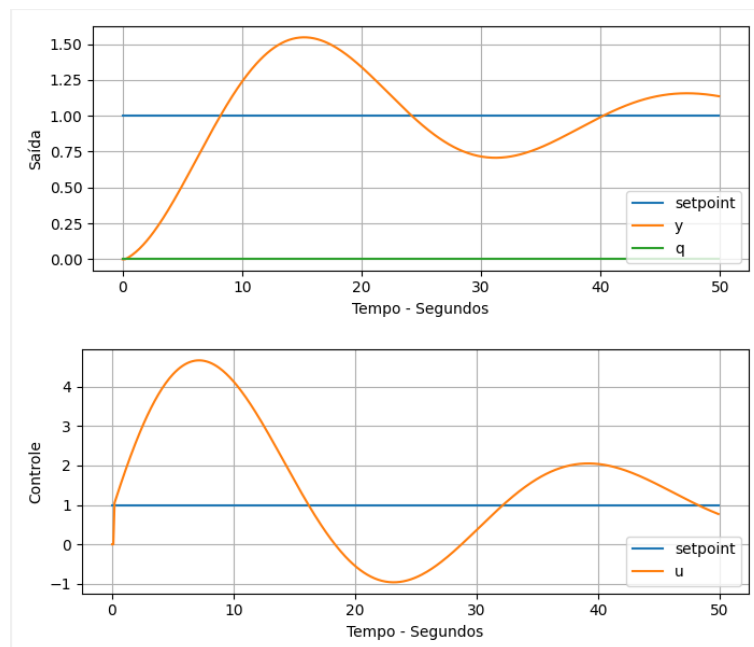


Figura 11: Gráficos