

# Ferramentas Interativas de Código Aberto para Estudo de Controladores Clássicos

Barbosa, G. \* Azevedo Júnior, A. P. \* Normey-Rico, J. E. \*

\* *Dep. de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, (e-mail: gabriel.a.barbosa@grad.ufsc.br, arnaldo.junior@ifma.edu.br, julio.normey@ufsc.br)*

---

**Abstract:** This paper presents an open source set of interactive tools for teaching analysis and design of classical controllers. The tool is a Python-based software and considers different structures used in an introduction to process control lecture at UFSC, as like ON-OFF controller and PID controllers. The main characteristics of these proposed tools are the simplicity and interactivity, as they allow to analyse and notice the impact of changing the controller and model parameters.

**Resumo:** Este artigo apresenta um conjunto de ferramentas interativas de código aberto para o ensino de controladores clássicos. Estas ferramentas, desenvolvidas na linguagem Python, consideram diferentes estruturas de controle usadas na disciplina de introdução ao controle de processos da UFSC, como o controlador ON-OFF e o controlador PID. As principais características das ferramentas propostas são a simplicidade e a interatividade, permitindo analisar de forma simples o impacto da mudança dos parâmetros do controlador e do modelo no desempenho do sistema em malha fechada.

*Keywords:* Classical Controllers; Interactive-Tool; Open-Source; Python; Educational

*Palavras-chaves:* Controladores Clássicos; Ferramenta Interativa; Código Aberto; Python; Educação

---

## 1. INTRODUÇÃO

A apresentação dos conceitos de controle de processos (sistemas de controle) geralmente envolve o uso de ferramentas matemáticas sofisticadas, como a Transformada de Laplace e a Transformada de Fourier, para representar os processos por meio de modelos de entrada-saída usando funções de transferência (como explorado em Franklin and Emami-Naeini (2013) e Garcia (2017)) ou através da representação por meio de variáveis de estado (como explorado em Ogata and Severo (1998) e Maciejowski (1984)). No entanto, para ensinar os fundamentos essenciais do controle de processos, é possível utilizar ferramentas matemáticas menos sofisticadas, como equações diferenciais ordinárias de primeira ordem e equações a diferenças em tempo discreto (Normey-Rico and Morato, 2022). Adotando uma abordagem teórico-prática na apresentação desses conceitos, o uso de ferramentas de simulação interativa pode potencializar a assimilação desses princípios.

As ferramentas de simulação interativa são notáveis por suas representações gráficas e elementos ajustáveis. Quando um parâmetro ou entrada é modificado, a resposta a essa alteração é imediatamente visível, o que contribui para o processo de aprendizagem, ao estabelecer uma relação direta entre os parâmetros ajustados e as respostas obtidas (Guzmán et al., 2023). Ferramentas interativas variam em níveis de interatividade, desde a substituição da programação por texto estruturado por diagramas de blocos, como demonstrado em (Tilbury et al., 1998), até a adição de gráficos iterativos, como visto em Kelly dos San-

tos Silva and de Azevedo Júnior (2021), têm sido utilizadas para o estudo e aprendizado de sistemas de controle, entretanto, a necessidade de recursos matemáticos sofisticados como a sua implementação na análise de compensadores de tempo morto em Normey-Rico et al. (2009) e no projeto de controladores para sistemas lineares em Díaz et al. (2017), não são adequadas para uma disciplina introdutória à sistemas de controle.

Dessa forma, este artigo apresenta um conjunto de ferramentas interativas que têm como objetivo demonstrar o impacto da alteração dos parâmetros dos controladores ON-OFF e PID (proporcional-integral-derivativo) na resposta de um processo de primeira ordem, especialmente pensadas para uma disciplina de introdução ao controle de processos. Essas ferramentas foram desenvolvidas utilizando os pacotes Tkinter (Lundh, 1999) e Matplotlib e Numpy (Nelli, 2018) disponíveis na linguagem Python. Esses pacotes foram escolhidos devido ao seu código aberto, o que significa que os códigos-fonte podem ser compartilhados e modificados. Neste artigo, descrevemos algumas das ferramentas interativas desenvolvidas, as quais estão disponíveis para *download* nos formatos executável<sup>1</sup>, eliminando a necessidade de recompilação, e código-fonte<sup>2</sup>, o qual pode ser modificado.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 é apresentado o modelo usado para desenvolver as ferramentas. Na seções 3 e 4, são descritos, respecti-

---

<sup>1</sup> *Link* para as ferramentas compiladas no *Google Drive*

<sup>2</sup> *Link* para os códigos-fonte no *GitHub*

vamente, os controladores implementados e os principais aspectos da interface gráfica. Finalmente, as seções 5 e 6 são dedicadas, respectivamente, a exemplos e conclusões.

## 2. SIMULAÇÃO DO PROCESSO

Neste artigo, utiliza-se um modelo dinâmico estável de primeira ordem no domínio do tempo discreto com atraso puro  $L$  ( $L \geq 0$ ), apresentado na equação (1) para realizar as simulações numéricas das ferramentas propostas.

$$y(k) = \frac{\tau}{\tau + t_s} y(k-1) + \frac{t_s K_e}{\tau + t_s} u(k-l-1) + \frac{t_s K_q}{\tau + t_s} q(k-l-1) \quad (1)$$

onde  $y$  é a variável controlada;  $u$ , a variável manipulada,  $q$ , uma perturbação externa que atua no processo;  $t_s$ , o passo de simulação e de amostragem do processo e  $l$  é a divisão de  $L$  por  $t_s$  arredondada para baixo, por simplicidade. Os parâmetros do modelo são a constante de tempo do processo,  $\tau$ ; o ganho estático relativo ao controle,  $K_e$ , e o ganho estático relativo à perturbação,  $K_q$ . Além disso, é importante notar que, para refletir a prática comum em processos reais, consideramos a presença de limites para o sinal de controle  $u$ , sendo  $U_{max}$  e  $U_{min}$  os limites de atuação superior e inferior, respectivamente.

## 3. CONTROLADORES PROPOSTOS

Os controladores realimentados ON-OFF e PID foram escolhidos para o desenvolvimento das ferramentas por serem amplamente utilizados na indústria e também em equipamentos domésticos, devido a sua simplicidade, no caso do ON-OFF, e desempenho satisfatório para muitas aplicações práticas (Astrom and Hagglund, 2006). No caso do PID, por motivos didáticos, foram desenvolvidas ferramentas para cada um dos seguintes casos: controle P (proporcional), controle I (integral), controle PI (proporcional-integral) simples, controle PI com *anti-windup*, controle PI com ponderação da referência, controle PID simples, controle PID com ação derivativa na saída e controle PID com filtro para ruído.

A seguir serão apresentadas as leis de controle de cada tipo de controlador implementado nesse conjunto de ferramentas. Para uma explanação detalhada de cada estratégia de controle e a razão pela qual é interessante estudar cada uma delas, o leitor pode consultar o livro Introdução ao Controle de Processos (Normey-Rico and Morato, 2021).

### 3.1 Controlador ON-OFF

Com esse primeiro simulador, espera-se que os estudantes possam compreender as principais características de um sistema em malha fechada com um controlador ON-OFF. Por exemplo, o fato da variável controlada não estabilizar no valor da referência e que a frequência de comutação do atuador aumenta em comparação com o mesmo sistema com uma banda de operação mais estreita ou com um sistema mais rápido.

Para a implementação do controlador ON-OFF, é considerada a existência de uma banda de operação,  $bw$ , ao redor

da referência  $sp$ . A equação usada para implementar a lei de controle é<sup>3</sup>:

$$u(k) = \begin{cases} U_{max}, & y(k) \leq sp(k) - bw \\ U_{min}, & y(k) \geq sp(k) + bw \\ u(k-1), & -bw < y(k) - sp(k) < +bw \end{cases} \quad (2)$$

Nesta ferramenta, é possível alterar os dois parâmetros do controle  $sp$  e  $bw$  para estudar o efeito deles no desempenho da malha fechada. Por outro lado, pode-se também observar como as variações nas características do processo alteram o comportamento do sistema.

### 3.2 Controlador P

O controlador proporcional proposto tem dois parâmetros de ajuste da lei de controle, sendo eles: um ganho proporcional,  $K_p$ , e uma compensação de erro,  $bias$ . A lei de controle pode ser expressa por:

$$u_p(k) = [sp(k) - y(k)] K_p + bias. \quad (3)$$

Com o uso dessa ferramenta, os estudantes podem realizar simulações para: (i) observar como é possível ajustar o ganho  $K_p$  para mudar a velocidade da resposta em malha fechada do sistema; (ii) compreender que é necessário usar o sinal de  $bias$  para alcançar o ponto de operação  $sp$ ; (iii) perceber que o  $bias$  necessário para manter  $y = sp$  varia de acordo com a perturbação aplicada no sistema e com o próprio  $sp$ .

Além disso, os estudantes podem observar que a solução não é robusta às variações nos parâmetros do processo. Por exemplo, caso o ganho estático do processo varie, o valor de  $bias$  deve ser reajustado para levar o sistema de volta ao ponto de operação. Finalmente, a ferramenta também ajuda a analisar o efeito da saturação na ação de controle. Variando os valores de  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  e  $K_p$ , os estudantes podem explorar a banda proporcional do controlador e perceber que, com o aumento de  $K_p$ , o comportamento do sistema se aproxima de um controle ON-OFF.

### 3.3 Controlador I

Esse controlador incorpora um ganho integral,  $K_i$ . Portanto, a lei de controle, implementada de forma discreta e recursiva, com uma aproximação retangular da integral, pode ser descrita por:

$$u_i(k) = [sp(k) - y(k)] K_i t_s + u_i(k-1) \quad (4)$$

Pode-se verificar a robustez da ação I, demonstrando que, mesmo variando o  $K_e$  do processo<sup>4</sup>, o controle I consegue levar a variável de processo ao  $sp$ . Além disso, observa-se que o sistema oscila dependendo do ajuste do ganho do controlador.

### 3.4 Controlador PI

Para a implementação do controlador PI definimos um ganho proporcional,  $K_p$ ; um ganho integral,  $K_i$ ; o sinal de erro entre a referência e o valor atual da planta,  $e(k)$ ;

<sup>3</sup> Estas equações valem para processos com  $K_e > 0$

<sup>4</sup> Assumindo que o atuador não sature no ponto de equilíbrio

o sinal de atuação referente ao ganho proporcional,  $u_p(k)$  e o sinal de atuação referente ao ganho integrativo,  $u_i(k)$ .

$$e(k) = sp(k) - y(k) \quad (5)$$

$$u_p(k) = K_p e(k) \quad (6)$$

$$u_i(k) = K_i t_s e(k) + u_i(k-1) \quad (7)$$

$$u_{pi}(k) = u_p(k) + u_i(k) \quad (8)$$

Dessa forma, os estudantes podem compreender o efeito de cada ação de controle e ajustar intuitivamente os parâmetros  $K_p$  e  $K_i$ , observando a resposta do sistema para mudanças no  $sp$  e em  $q$ . Além disso, esse simulador permite a inserção de ruído de medição, possibilitando a observação do efeito desse ruído na variável manipulada. Ao variar o ganho proporcional, os estudantes podem notar como a ação de controle amplifica o ruído quando está habilitada.

Por outro lado a ferramenta permite observar alguns efeitos práticos do uso desse controlador: (i) a dificuldade em ajustar adequadamente a dinâmica da resposta às mudanças de  $sp$  e de  $q$ , evitando picos na variável de processo; (ii) a observação do efeito de acumulação da ação integral (*windup*) quando o atuador satura. Devido à sua importância prática, foram desenvolvidas duas ferramentas independentes para tratar destes dois problemas práticos, que serão discutidas a seguir, juntamente com técnicas para mitigar o seus efeitos.

### 3.5 Controlador PI com Ponderação da Referência

Uma técnica usada para mitigar o efeito das mudanças abruptas da referência na saída do processo é a ponderação da referência por um fator menor que 1, o que não altera a dinâmica de rejeição de perturbações.

Considere o mesmo sinal de erro, definido na equação (5), e a atuação referente ao ganho integral, definido na equação (7). Além disso, é introduzido um fator  $b$ , com  $0 \leq b \leq 1$ , como sendo a ponderação da referência. Assim, a lei de controle do PI com ponderação da referência é a seguinte:

$$u_p(k) = K_p [b \cdot sp(k) - y(k)] \quad (9)$$

$$u_{pi}(k) = u_p(k) + u_i(k) \quad (10)$$

Na ferramenta, os estudantes podem analisar os efeitos da ponderação da referência na resposta do processo, bem como a diferença entre o tempo de acomodação após a mudança do  $sp$  e  $q$ .

### 3.6 Controlador PI com Ação Anti-windup

Observe que, quando o atuador satura, a parte integradora continua incrementando<sup>5</sup> o sinal de atuação, mesmo que não tenha nenhum efeito prático, uma vez que o valor de controle aplicado ao processo é fixo e igual a  $U_{max}$ <sup>6</sup>. Quando  $y$  atinge a referência, a componente integradora precisa descarregar toda a ação integrativa que acumulou com o controlador saturado, resultando em um erro de sinal oposto ao que ocorreu durante a saturação. Para evitar essa situação, é necessário indicar ao controlador que o atuador está saturado e, dessa forma, o controlador para de incrementar a componente integrativa. Uma forma

<sup>5</sup> ou decrementando

<sup>6</sup> ou  $U_{min}$

de fazer isso é atualizar adequadamente o valor do controle a cada passo, antes do cálculo recursivo.

A forma recursiva do PI é:

$$u_{pi}(k) = u_{pi}(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i t_s e(k) \quad (11)$$

Assim, a ação *anti-windup* pode ser implementada usando a seguinte lógica, atualizando o valor de  $u_{pi}(k)$  caso o atuador sature:

$$u_{wp}(k) = \begin{cases} U_{max}, & u_{pi}(k) > U_{max} \\ u_{pi}(k), & U_{max} \geq u_{pi}(k) \geq U_{min} \\ U_{min}, & u_{pi}(k) < U_{min} \end{cases} \quad (12)$$

$$u_{pi}(k) = u_{wp}(k) \quad (13)$$

Com essa ferramenta, os estudantes podem comparar o comportamento do controlador com e sem *anti-windup* quando há saturação do atuador. Como os limites do atuador e a dinâmica do processo podem ser modificadas de forma simples e interativa, os estudantes podem observar como o efeito do *anti-windup* se torna mais significativo quando o sistema é lento e a faixa de atuação mais restritiva.

### 3.7 Controlador PID

Para definir o controlador PID, serão utilizadas as definições já apresentadas para a componente proporcional, equação (6); à componente integrativa, equação (7), e a definição do erro, equação (5), calcula-se a componente derivativa do controlador, considerando um sistema de diferença atrasada (Lathi, 2009):

$$u_d(k) = K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{t_s} \quad (14)$$

e assim:

$$u_{pid}(k) = u_p(k) + u_i(k) + u_d(k) \quad (15)$$

Foram desenvolvidas três ferramentas de controladores PID. A primeira é a básica, que implementa a lei de controle da equação (15). O objetivo dessa ferramenta é compreender o efeito de cada uma das ações na resposta do sistema de malha fechada, com foco especial no efeito da ação derivativa. Durante as simulações, os estudantes podem perceber a dificuldade de ajustar manualmente as três ações e a importância de ter regras de sintonia pré-calculadas.

Além disso, podem ser estudados mais dois aspectos no sinal de controle: (i) a amplitude do sinal de controle em resposta a mudanças de  $sp$  e (ii) o impacto do ruído no aumento do esforço de controle com o aumento de  $K_d$ .

### 3.8 Controlador PID com Ação Derivativa na Saída

Para lidar com os picos na ação de controle resultantes de mudanças abruptas no sinal de referência, é implementada uma adaptação do controlador PID, com ação derivativa apenas na saída do processo. Neste caso, a ação derivativa pode ser calculada como, novamente como um sistema de diferença atrasada:

$$u_{dy}(k) = -K_d \frac{y(k) - y(k-1)}{t_s} \quad (16)$$

Assim, podemos definir a lei do controlador:

$$u_{pidy}(k) = u_p(k) + u_i(k) + u_{dy}(k) \quad (17)$$

Com essa ferramenta, os estudantes podem observar a diferença na ação de controle para mudanças na referência quando a ação derivativa é aplicada ao sinal de erro e quando é aplicada apenas à saída do sistema. Note também que essa mudança não afeta a rejeição de perturbações ou a amplificação de ruído no sinal de controle.

### 3.9 Controlador PID com Filtro

A ação derivativa amplifica o ruído inerente a qualquer sistema de medição, uma vez que esse ruído contém uma quantidade significativa de componentes que variam rapidamente (Lathi, 2009). Uma maneira de mitigar esse fenômeno é implementar um filtro passa-baixa no sinal que alimenta a ação derivativa.

O propósito dessa ferramenta é observar o comportamento da ação derivativa quando sujeito a um sinal ruidoso e como um filtro pode reduzir o esforço de controle adicional causado pela amplificação do ruído.

Considere a saída filtrada  $y_f$ , sendo  $\tau_f$  a constante de tempo do filtro.

$$y_f(k) = \frac{\tau_f}{\tau_f + t_s} y_f(k-1) + \frac{t_s}{\tau_f + t_s} y(k) \quad (18)$$

Assim, a componente referente ao ganho derivativo pode ser descrita por:

$$u_{dyf}(k) = -K_d \frac{y_f(k) - y_f(k-1)}{t_s} \quad (19)$$

Assim, a lei de controle pode ser expressa por:

$$u_{pidf}(k) = u_p(k) + u_i(k) + u_{dyf}(k) \quad (20)$$

Na ferramenta o estudante pode variar a constante de tempo do filtro, a amplitude do ruído e a ação derivativa do controlador para observar os efeitos destes parâmetros no sistema em malha fechada.

## 4. VISÃO GERAL DA INTERFACE GRÁFICA

A interface gráfica, que é similar em todas as ferramentas, tem como objetivo permitir que o usuário varie os parâmetros dos controladores e visualize, interativamente, o impacto que essa mudança causa nas variáveis do processo. De forma genérica, a interface gráfica pode ser dividida em blocos que serão discutidos a seguir, e podem ser visualizados na Figura 1 (neste caso para um controlador PI com *anti-windup*).

### 4.1 Apresentação de Respostas no Tempo

Na parte direita da janela principal (destacado em azul na figura (1)), são exibidos dois gráficos, o primeiro para mostrar a evolução da variável de processo, da referência e da perturbação aplicada no processo, enquanto o segundo exibe o sinal de controle.

### 4.2 Parâmetros do Modelo e Controlador

Nessa parte da interface gráfica, no quadro à esquerda dos gráficos (destacado em vermelho na figura (1) e detalhado na figura (4)), existem controles deslizantes (figura (3)) com o objetivo de permitir os estudantes possam variar os

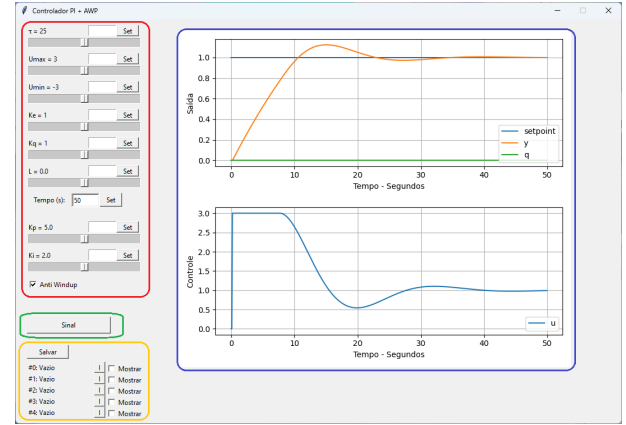


Figura 1. Interface gráfica da ferramenta interativa do controlador PI com ação *anti-windup*. Em vermelho, ajuste dos parâmetros do modelo e do controlador; em verde, botão para a criação de sinais; em amarelo, interface para armazenamento de formas de onda e, em azul, gráficos com a saída do processo e ação de controle.

parâmetros do modelo e do controle de forma que mostre no mesmo instante o impacto dessa mudança.

Os parâmetros que podem ser alterados variam de ferramenta para ferramenta, dependendo do controlador utilizado. Entretanto, para todos os controladores, há o ajuste dos parâmetros do modelo da planta, sendo eles:  $\tau$ , constante de tempo do modelo, em segundos;  $U_{max}$ , limite superior de saturação do atuador;  $U_{min}$ , limite inferior de saturação do atuador;  $Ke$ , ganho estático referente à atuação;  $Kq$ , ganho estático referente à perturbação e  $L$ , o atraso, em segundos. Além desses ajustes, há um ajuste da escala de tempo, no qual o usuário pode inserir o tempo máximo de simulação, em segundos, observe que, após a mudança da escala de tempo, todas as formas de onda salvas irão ser deletadas. Os demais parâmetros, variam de controlador para controlador, mas todos seguem a mesma lógica: existe um controle deslizante (ou uma caixa de seleção) para cada parâmetro do controlador. Por exemplo, na figura (1), como se trata de um controle PI com ação *anti-windup*, apenas temos o ajuste dos ganhos proporcional e integral e a caixa de seleção para habilitar ou não a ação *anti-windup*, além dos controles deslizantes referentes aos parâmetros do modelo.

### 4.3 Criação de Sinais

No canto esquerdo inferior da janela principal está o botão para criação de sinais. Ao apertar o botão “Sinal”, irá aparecer uma nova janela (figura 2) na qual o usuário poderá descrever alguma forma de onda de seu interesse dentre as formas disponíveis. Para tal, existem caixas de seleção que permitem usar o sinal definido como sinal de referência (“Usar como SP”), sinal de perturbação (“Usar como Q”) ou sinal de atuação (“Usar como U”). Note que ao marcar a última caixa de seleção, a ferramenta assume um comportamento em malha aberta, ou seja, a ação do controlador é desacoplada da dinâmica do modelo do processo.

Nessa janela, também é possível adicionar ruído à simulação, por meio da caixa de seleção “Add Ruído”. Podemos

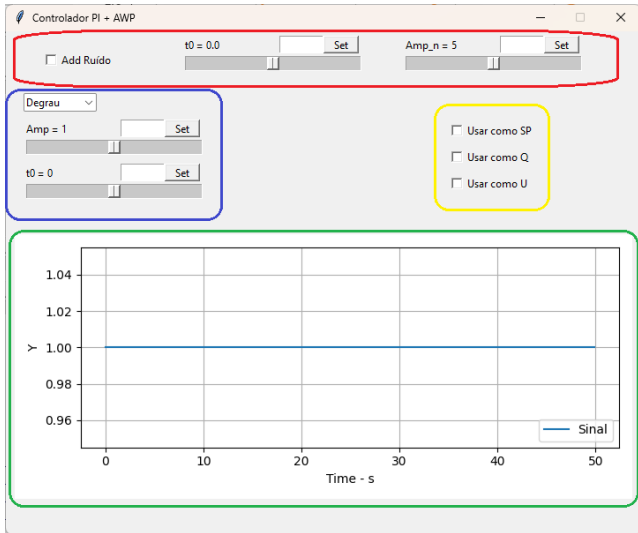


Figura 2. Janela aberta após apertar o botão “Sinal”. Em vermelho, os controles associados com a adição de ruído; Em azul, os parâmetros da forma de onda escolhida, varia de forma de onda para forma de onda; Em amarelo, as caixas de seleção para escolher a forma que o sinal criado será utilizado e, em verde, a pré-visualização do sinal sendo criado



Figura 3. Controle deslizante que altera o  $K_e$  da ferramenta interativa do controlador PI com ação *anti-windup*. É possível alterar o valor da variável deslizando o controlador ou escrevendo um valor na caixa de texto e clicando no botão “Set”

configurar a existência de ruído a partir de um momento “ $t_0$ ” e com amplitude definida pelo controle deslizante “ $Amp_n$ ”.

É possível definir um sinal para ser usado na simulação, dentre alguns sinais: Degrau, Seno, Triangular ou Quadrada. Assim, para cada forma de onda, surgem controladores deslizantes responsáveis por ajustar parâmetros de cada forma de onda.

#### 4.4 Salvando Resultados

Na última seção na parte inferior à esquerda da janela principal, está o menu para salvar os resultados de um experimento (destacado em amarelo na figura (1)), para poder realizar comparações. Ao pressionar o botão salvar e escolher uma das opções disponíveis para mostrar, a ferramenta mantém os resultados da simulação realizada, que pode ser logo comparada com a seguinte. O usuário pode dar nome a cada simulação que deseja salvar e escolher a que deseja mostrar por meio da janela (figura 5) que surge ao pressionar o botão “Salvar”.

### 5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para mostrar o uso da ferramenta, é apresentado nesta seção um exemplo na qual se compara o comportamento de

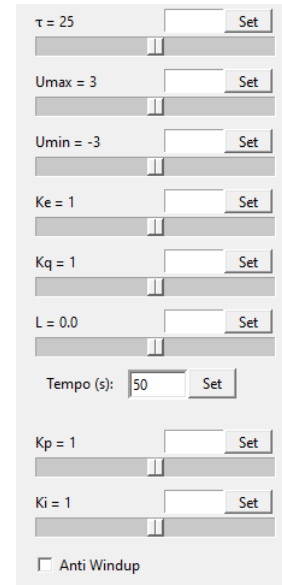


Figura 4. Parâmetros do processo e do controlador na ferramenta interativa do controlador PI com ação *anti-windup*. Os seis primeiros controles deslizantes são referentes aos parâmetros do processo e os dois últimos são referentes aos parâmetros do controlador

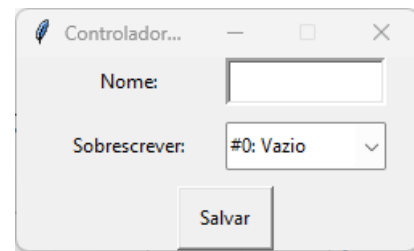


Figura 5. Janela utilizada para salvar as formas de onda. Defina um nome para a forma de onda e selecione alguma outra forma de onda, ela irá ser sobrescrita pela nova forma de onda

um controlador PI com e sem ação *anti-windup*. Considera-se que o controle PI já foi estudado e sua implementação e ajuste analisados com a ferramenta correspondente. A ferramenta para PI com *anti-windup* é específica para o uso e entendimento do fenômeno de *windup* e da estratégia *anti-windup*. O controlador PI usa o seguinte ajuste:  $K_p = 5$ ,  $K_i = 4$ , considerando os parâmetros do processo como  $\tau = 15s$ ,  $U_{max} = 3$ ,  $U_{min} = -3$ ,  $K_e = 1$ ,  $K_q = 1$  e  $L = 0$ .

Para este exemplo, o estudante deve ajustar na janela principal os valores dos parâmetros da planta e do controle, usando os controles deslizantes correspondentes. Após isso, deve definir o cenário de simulação escolhendo os sinais aplicados no processo, que neste caso são um degrau unitário na referência e não há perturbações.

Na primeira parte da experiência, o estudante observa o efeito *windup*, observando que mesmo após a saída do sistema superar o valor de referência, a ação de controle permanece saturada no controlador PI, o que leva a obter uma resposta da variável de processo com um sobressinal elevado. Também se observa um tempo de acomodação longo para esta situação. Com essa ferramenta o estudante

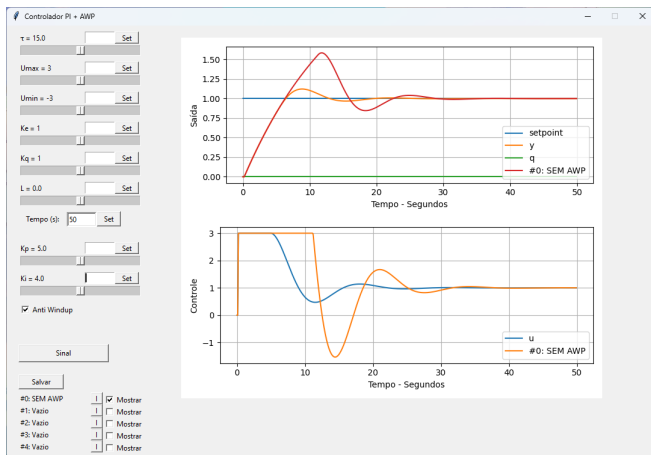


Figura 6. Comparação da resposta do sistema de exemplo:

(i) No gráfico referente à saída, em laranja, a resposta com ação *anti-windup* e, em vermelho, a resposta sem ação *anti-windup*; (ii) no gráfico referente ao sinal de controle, em laranja, o sinal de atuação sem *anti-windup* e, em azul, com *anti-windup*

pode analisar o efeito do ajuste do PI nesta resposta, por exemplo, ajustando o sistema para uma resposta mais lenta, mas com menos sobre sinal. Ou também analisar o efeito do valor de  $U_{max}$  na resposta do sistema.

Para fins de comparação, a segunda parte do experimento consiste em simular o sistema com a ação *anti-windup* habilitada e comparar com o resultado anterior. Assim, o usuário deve salvar o resultado já obtido utilizando o menu salvar, como já detalhado, antes de acionar o novo controle com *anti-windup*.

Como mostra a figura (6), neste caso o sobressinal é consideravelmente menor do que o obtido com o outro controlador, dado que o atuador sai da saturação mais rapidamente, uma vez que o controle não acumula a ação integrativa após a saturação do atuador.

## 6. CONCLUSÃO

O uso de ferramentas interativas em sala de aula durante o desenvolvimento dos temas relacionados ao controle de processos se apresenta como uma forma de potencializar o aprendizado dos conceitos. Essas ferramentas permitem aos estudantes observar os efeitos causados pela mudança dos parâmetros do sistema instantaneamente, com recursos visuais, permitindo o aumento da compreensão a cerca dos assuntos trabalhados em sala de aula.

Utilizar diferentes ferramentas para desenvolver aspectos específicos de cada controlador mostra-se uma abordagem notável, uma vez que permite trabalhar em especificidades da implementação de cada controlador, usando ferramentas mais simples, com menos parâmetros livres e menor complexidade gráfica. Dessa forma, é possível se familiarizar com o comportamento de cada tipo de controlador.

As ferramentas vem sendo usadas na disciplina desde o segundo semestre de 2022, entretanto não há resultados concretos acerca da aceitação dos alunos quanto ao uso das ferramentas, uma vez que as versões definitivas somente

começaram a ser usadas no primeiro semestre de 2023. Resultados objetivos estarão disponíveis futuramente.

Como sugestão para trabalhos futuros, há o interesse de desenvolver ferramentas similares para outras disciplinas de controle do curso, que tratam de técnicas mais sofisticadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq projeto 304032/2019-0.

## REFERÊNCIAS

- Astrom, K.J. and Haggund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA, Advanced PID control. URL <https://cds.cern.ch/record/1514097>. The book can be consulted by contacting: BE-ABP: Sosin, Mateusz.
- Díaz, J.M., Costa-Castelló, R., Muñoz, R., and Dormido, S. (2017). An interactive and comprehensive software tool to promote active learning in the loop shaping control system design. *IEEE Access*, 5, 10533–10546. doi:10.1109/ACCESS.2017.2712520.
- Franklin, G.F., P.J. and Emami-Naeini, A. (2013). *Sistemas de controle para engenharia*. Bookman Editora.
- Garcia, C. (2017). *Controle de processos industriais: estratégias convencionais*. Editora Blucher.
- Guzmán, J., Costa-Castelló, R., Berenguel, M., and Dormido, S. (2023). *Automatic Control with Interactive Tools*. Springer International Publishing. URL <https://books.google.com.br/books?id=zUYuzwEACAAJ>.
- Kelly dos Santos Silva, R.J.M.S. and de Azevedo Júnior, A.P. (2021). Proposta de plataforma para ensino de controle preditivo por matriz dinâmica com aplicação em sistema térmico. doi:10.20906/sbai.v1i1.2829.
- Lathi, B.P. (2009). *Linear Systems and Signals*. Oxford University Press, Inc., USA, 2nd edition.
- Lundh, F. (1999). An introduction to tkinter. URL: [www.pythonware.com/library/tkinter/introduction/index.htm](http://www.pythonware.com/library/tkinter/introduction/index.htm).
- Maciejowski, J. (1984). *Multivariable Feedback Design*. Addison-Wesley.
- Nelli, F. (2018). *Python Data Analytics: With Pandas, NumPy, and Matplotlib*. doi:10.1007/978-1-4842-3913-1.
- Normey-Rico, J., Guzman, J., Dormido, S., Berenguel, M., and Camacho, E. (2009). A unified approach for dtc design using interactive tools. *Control Eng. Practice*.
- Normey-Rico, J. and Morato, M. (2021). *Introdução ao controle de processos*, volume 1. Editora Blucher.
- Normey-Rico, J. and Morato, M. (2022). Introdução ao controle de processos: Ensinando controle com matemática básica. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*.
- Ogata, K. and Severo, B. (1998). *Engenharia de controle moderno*. Prentice Hall do Brasil.
- Tilbury, D., Luntz, J., and Messner, W. (1998). Controls education on the www: tutorials for matlab and simulink. 2, 1304–1308 vol.2. doi:10.1109/ACC.1998.703625.