



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

**RELATÓRIO DA 2ª UNIDADE**  
**Controladores PID**

**TURMA: 01**  
**GRUPO 3**

**THIAGO THEIRY DE OLIVEIRA: 20210094287**

**GUILHERME PABLO DE SANTANA MACIEL: 20210094008**

**MAGNUS BRÍGIDO PAULO FREIRE: 20210094198**

**ENRICO LUIGI OLIVIERO: 20210073287**

**Natal-RN**  
**2023**

THIAGO THEIRY DE OLIVEIRA: 20210094287

GUILHERME PABLO DE SANTANA MACIEL: 20210094008

MAGNUS BRÍGIDO PAULO FREIRE: 20210094198

ENRICO LUIGI OLIVIERO: 20210073287

## **CONTROLE PID DE SISTEMAS DINÂMICOS DE PRIMEIRA ORDEM, SEGUNDA ORDEM E MODELO EM CASCATA**

Segundo Relatório apresentado à disciplina de Laboratório de Sistemas de Controle, correspondente à avaliação da 2ª unidade do semestre 2023.1 do 8º período do curso de Engenharia de Computação e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sob orientação do **Prof. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo**.

Professor: Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo.

Natal-RN  
2023

## RESUMO

Este relatório descreve o procedimento de estudo, análise e implementação de controladores. Utilizando o sistema de tanques acoplados da Quanser, foram aplicados controladores dos tipos proporcional (P), proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI), e proporcional-integral-derivativo (PID) juntamente com filtros de ação derivativa e anti-reset-windup, em sistemas de primeira ordem (apenas o primeiro tanque), segunda ordem (controlando o segundo tanque) e em modo cascata (Utilizando dois controles interconectados). Em cada experimento, foram variados diferentes valores de ganho e as curvas de resposta do sistema e os sinais de controle foram observados para análise. Concluiu-se, com base na análise dos gráficos, que os resultados obtidos experimentalmente estão de acordo com a teoria.

**Palavras-chave:** controladores PID. sistemas dinâmicos. análise. sinais de controle.

## Lista de Figuras

1	Planta completa da simulação 1. . . . .	14
2	Planta completa da simulação 2. . . . .	15
3	Planta completa da simulação 3. . . . .	16
4	controlador Proporcional (P) . . . . .	17
5	controlador Proporcional-Derivativo (PD) . . . . .	18
6	controlador Proporcional-Integral (PI) . . . . .	19
7	controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) . . . . .	20
8	controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com Filtro na Ação Derivativa . .	21
9	controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com Filtro na Ação Integral (Anti-Reset Windup) . . . . .	22
10	Controlador Proporcional (P) . . . . .	23
11	controlador Proporcional-Derivativo (PD) . . . . .	24
12	controlador Proporcional-Integral (PI) . . . . .	25
13	controlador Proporcional-Integral (PI) com $K_i$ maior . . . . .	26
14	controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) . . . . .	27
15	controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com Filtro na Ação Derivativa . .	28
16	Presença de Ruído sem filtro X com filtro . . . . .	29
17	controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com Filtro na Ação Integral (Anti-Reset Windup) . . . . .	30
18	Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional derivativo - Proporcional derivativo) . . . . .	31
19	Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional - Proporcional) . . . . .	32
20	Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional integrativo - Proporcional integrativo) . . . . .	33
21	Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Integrativo - Proporcional Derivativo) . . . . .	34
22	Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Derivativo - Proporcional Integrativo) . . . . .	35
23	Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Integral Derivativo - Proporcional Integral Derivativo) . . . . .	37
24	Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Integral Derivativo - Proporcional Derivativo) . . . . .	38
25	Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Integral Derivativo - Proporcional Integrativo) . . . . .	39

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>8</b>
2.1	Sistemas de 1º Ordem . . . . .	8
2.2	Sistemas de 2º Ordem . . . . .	8
2.3	Sistema em Cascata . . . . .	9
2.4	Ações de Controle . . . . .	10
2.4.1	Controle Proporcional . . . . .	10
2.4.2	Controle Derivativo . . . . .	10
2.4.3	Controle Integrativo . . . . .	11
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>12</b>
3.1	Ferramentas . . . . .	12
3.1.1	Bancada Quanser . . . . .	12
3.1.2	MatLab . . . . .	12
3.1.3	Simulink . . . . .	12
3.2	Simulações . . . . .	13
3.2.1	Simulação 1 . . . . .	13
3.2.2	Simulação 2 . . . . .	14
3.2.3	Simulação 3 . . . . .	15
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>17</b>
4.1	Simulação 1 - Sistemas de Primeira Ordem . . . . .	17
4.1.1	Controle Proporcional (P) de Primeira Ordem . . . . .	17
4.1.2	Controle Proporcional-Derivativo (PD) de Primeira Ordem . . . . .	18
4.1.3	Controle Proporcional-Integral (PI) de Primeira Ordem . . . . .	19
4.1.4	Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) de Primeira Ordem . . . . .	20
4.1.5	Controle PID de Primeira Ordem com Filtro na Ação Derivativa . . . . .	21
4.1.6	Controle PID de Primeira Ordem com Filtro na Ação Integral (Anti-Reset Windup) . . . . .	22
4.2	Simulação 2 - Sistemas de Segunda Ordem . . . . .	23
4.2.1	Controle Proporcional (P) de Segunda Ordem . . . . .	23
4.2.2	Controle Proporcional-Derivativo (PD) de Segunda Ordem . . . . .	24
4.2.3	Controle Proporcional-Integral (PI) de Segunda Ordem . . . . .	25
4.2.4	Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) de Segunda Ordem . . . . .	26
4.2.5	Controle PID de Segunda Ordem com Filtro na Ação Derivativa . . . . .	27
4.2.6	Diferença no PID com Filtro na Ação Derivativa . . . . .	28
4.2.7	Controle PID de Segunda Ordem com Filtro na Ação Integral (Anti-Reset Windup) . . . . .	29
4.3	Simulação 3 - Controle em Cascata . . . . .	30

4.3.1	Controlador primário - Proporcional / Controlador secundário - Proporcional	30
4.3.2	Controlador primário - Proporcional Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Derivativo . . . . .	32
4.3.3	Controlador primário - Proporcional Integrativo / Controlador secundário - Proporcional Integrativo . . . . .	33
4.3.4	Controlador primário - Proporcional Integrativo / Controlador secundário - Proporcional Derivativo . . . . .	34
4.3.5	Controlador primário - Proporcional Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Integrativo . . . . .	35
4.3.6	Controlador primário - Proporcional Integral Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Integral Derivativo . . . . .	36
4.3.7	Controlador primário - Proporcional Integral Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Derivativo . . . . .	38
4.3.8	Controlador primário - Proporcional Integral Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Integrativo . . . . .	39
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>41</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Sistemas de controle são conjuntos de componentes e processos que visam monitorar e regular o comportamento de sistemas físicos e tecnológicos, garantindo a estabilidade e eficiência das operações. Nesse contexto, estão os controladores PID, que são amplamente utilizados na indústria devido à sua robustez em várias aplicações. Apresentam uma estrutura de controle simples de implementar e são componentes fundamentais para estratégias de controle mais avançadas. Um controlador PID é um instrumento importante para regular variáveis de processo, como temperatura, vazão, pressão, velocidade, entre outras. Os controladores PID (proporcional, integral e derivativo) tem a ideia de combinar três componentes principais: a ação proporcional, a ação integral e a ação derivativa. Cada componente desempenha um papel específico na resposta do sistema às variações do erro e são considerados os controladores mais precisos e estáveis.

Neste estudo, o objetivo é realizar a projeção e análise de diferentes controladores - proporcional (P), proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI) e proporcional-integral-derivativo (PID) para o sistema de tanques acoplados da Quanser, avaliando o comportamento desses controladores em diferentes configurações e determinar qual deles oferece o melhor desempenho no cenário específico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir são apresentadas os principais conceitos, teorias, modelos, ferramentas e metodologias utilizadas na construção deste relatório e na coleta de dados durante os experimentos.

### 2.1 Sistemas de 1º Ordem

Um sistema de primeira ordem refere-se a um sistema dinâmico cujo comportamento pode ser descrito por uma equação diferencial de primeira ordem e também pode ser descrito pela sua função de transferência, que relaciona a entrada do sistema à saída. A função de transferência típica de primeira ordem é dada por:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (1)$$

A função de transferência  $G(s)$ , que é obtida a partir dessa expressão, representa a relação entre a variável de saída  $Y(s)$  e a variável de entrada  $X(s)$  de um sistema. Essa função de transferência também pode ser escrita como a divisão entre o ganho estacionário do processo ( $K$ ) e a constante de tempo de primeira ordem ( $T$ ). Essa relação entre a constante de tempo e a velocidade da resposta faz com que a função de transferência de primeira ordem também seja conhecida como atraso de primeira ordem. A constante  $T$  pode ser interpretada como o tempo necessário para a variável atingir 63,2% do seu valor de regime, enquanto o inverso de  $T$  representa a derivada da resposta no instante  $t = 0$ . (citar edisciplinas)

### 2.2 Sistemas de 2º Ordem

Um sistema de segunda é um sistema dinâmico cujo comportamento pode ser descrito por uma equação diferencial de segunda ordem e também pode ser descrito pela sua função de transferência, que relaciona a entrada do sistema à saída. A função de transferência pode ser representada da seguinte forma:

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

Considerando  $K = \omega_n^2$ , a equação pode ser reescrita como:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

onde as constantes  $\xi$  é o fator de amortecimento,  $\omega_n$  é a frequência natural e  $K$  é o ganho do sistema. De acordo com o valor de  $\xi$ , o sistema pode ser representado de três formas distintas. O sistema é denominado sobreamortecido para  $\xi > 1$ , o que produz dois pólos reais e distintos. Com um  $\xi = 1$ , o sistema é denominado criticamente amortecido, caracterizado pela produção de dois pólos reais e iguais. No terceiro caso de representação, o sistema é denominado subamortecido onde o fator de amortecimento está no intervalo  $0 < \xi < 1$ .



Analisando o gráfico de saída do sistema, identificamos o tempo de subida ( $t_r$ ), que representa o tempo necessário para que o sistema atinja pela primeira vez o seu valor de regime. Este tempo pode ser com a seguinte equação:

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad (4)$$

Onde  $\omega_d$  representa o valor da frequência natural amortecida. O valor de  $\beta$  é obtido por:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \quad (5)$$

O instante de pico ( $t_p$ ), representa o instante em que a resposta do sistema atinge o primeiro pico do sobressinal (overshoot). Definido por:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (6)$$

O sobressinal ( $M_p$ ) é uma característica da resposta de um sistema que ocorre quando a saída excede temporariamente o valor de estado estacionário. Seu valor pode ser obtido através da equação:

$$M_p = e^{-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\pi} \quad (7)$$

Para que o resultado seja representado percentualmente basta multiplicá-lo por 100.

Para que a resposta do sistema atinja e permaneça dentro de um valor de tolerância em torno do valor de estado estacionário é necessário a espera de um tempo, denominado tempo de estabilidade ( $t_{ss}$ ), ou tempo de acomodação. Dois valores comuns de tolerância para o tempo de estabilidade são 2% e 5% do valor de estado estacionário.

$$t_{ss} = \frac{4}{\xi \omega_n} \quad (\text{à } 2\%) \quad (8)$$

$$t_{ss} = \frac{3}{\xi \omega_n} \quad (\text{à } 5\%) \quad (9)$$

## 2.3 Sistema em Cascata

Os sistemas de controle em cascata são amplamente utilizados na indústria para controlar processos complexos. Esses sistemas envolvem a utilização de múltiplos controladores em série, onde a saída de um controlador é usada como entrada para o próximo controlador.

De acordo com Ogata (2010), a estrutura em cascata permite a separação dos requisitos de controle em duas camadas. O controlador primário é responsável por controlar a variável de processo principal, enquanto o controlador secundário ajusta a variável de controle do controlador primário. Essa abordagem permite um melhor desempenho e ajuste fino do sistema.

Dorf e Bishop (2016) destacam que o controlador secundário é projetado para eliminar as influências indesejadas do processo sobre o controlador primário. Isso é especialmente útil quando o processo possui características não lineares ou fortemente interativas. O controlador secundário atua

como um "ajuste fino" do sistema, melhorando a resposta e a estabilidade.

Em resumo, os controladores em cascata oferecem vantagens significativas no controle de sistemas complexos. A separação das camadas de controle permite um melhor ajuste e desempenho do sistema. Além disso, a utilização de múltiplos controladores em série melhora a robustez e a estabilidade do sistema de controle.

## **2.4 Ações de Controle**

### **2.4.1 Controle Proporcional**

No controle proporcional, a ação de controle é proporcional ao erro entre o valor desejado (referência) e o valor atual da variável controlada. O erro é calculado subtraindo-se o valor desejado do valor atual. O controlador P multiplica o erro por uma constante chamada de ganho proporcional ( $K_p$ ) e utiliza esse valor para gerar o sinal de controle (mundoprojetado). Algumas características do controlador P

- Atua no regime transitório e regime permanente do sistema. Isto é, ele tem efeito quando o sistema sai do ponto de partida e vai até o valor desejado (transitório) e também quando o sistema apresenta pouca ou nenhuma variação (regime permanente).
- O controle P não garante erro 0 no regime permanente
- Aumentar o ganho, normalmente, deixa a resposta do sistema mais rápida e diminui o erro, mas aumentar demais pode deixar o sistema instável por forçar o sistema a trabalhar em saturação (atua apenas em nível máximo ou mínimo).

### **2.4.2 Controle Derivativo**

Enquanto o controle proporcional age com base no erro atual, o controle derivativo age com base na taxa de variação do erro ao longo do tempo. Ele utiliza a derivada do erro em relação ao tempo para gerar o sinal de controle.

O controle derivativo é eficaz em prever as tendências futuras do sistema com base na taxa de mudança do erro. Isso permite uma resposta rápida a mudanças bruscas ou perturbações no sistema, ajudando a reduzir o tempo de resposta e a minimizar a sobrelevação (overshoot) do sistema (mundoprojetado). Algumas características do controlador D

- Atua apenas no regime transitório do sistema
- Não garante erro 0 no regime permanente
- Aumentar o ganho, normalmente, deixa a resposta do sistema mais rápida, mas um aumento excessivo pode deixar o sistema oscilatório

### 2.4.3 Controle Integrativo

Enquanto o controle proporcional age com base no erro atual e o controle derivativo age com base na taxa de variação do erro, o controle integrativo age com base na integral do erro ao longo do tempo. Ele acumula os erros passados para gerar o sinal de controle.

O controle integrativo é eficaz em corrigir o erro acumulado ao longo do tempo, garantindo que o sistema alcance a referência com precisão. Ele atua como um "ajuste fino" do controle proporcional, permitindo a eliminação do erro em regime permanente (mundoprojetado). Algumas características do controlador I

- Atua no regime transitório e regime permanente do sistema
- O controle I garante erro 0 no regime permanente
- Deixa o sistema mais lento e oscilatório
- Aumentar o ganho, normalmente, deixa a resposta do sistema mais rápida, mas aumentar demais pode deixar o sistema mais oscilatório por gerar um erro acumulado maior e possivelmente levar o sistema a saturação

## **3 METODOLOGIA**

A metodologia utilizada nos laboratórios de sistemas de controle envolve a utilização de equipamentos de medição e análise, visando sempre aprimorar a eficiência do controle e garantir o melhor desempenho do sistema.

### **3.1 Ferramentas**

#### **3.1.1 Bancada Quanser**

A bancada consiste em um sistema de tanques acoplados da Quanser que possibilita a medição e controle de diferentes níveis de líquido. A bomba transporta a água da bacia inferior, que possui volume máximo de 2 litros, até o topo do sistema e conta com sensores de pressão para medir o nível de água conforme ele é alterado.

#### **3.1.2 MatLab**

Ele é uma linguagem de programação interativa que faz cálculos numéricos, tem seu próprio Integrated Development Environment (IDE) e um conjunto de bibliotecas (toolboxes). Estas, podem ser usadas em diversas áreas, desde equações diferenciais, até estatísticas, processamento de sinais, finanças e outros. Por causa de sua estrutura diferenciada, capacidade de expansão e flexibilidade, o software possui também as ferramentas de elementos finitos, inteligência artificial, depuração de processamento em tempo real e diversas outras soluções.

#### **3.1.3 Simulink**

Simulink, desenvolvido pela companhia MathWorks, é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Sua interface primária é uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis de blocos. O software oferece alta integração com o resto do ambiente MATLAB. Simulink é amplamente usado em teoria de controle e processamento digital de sinais para projeto e simulação multi-domínios

## 3.2 Simulações

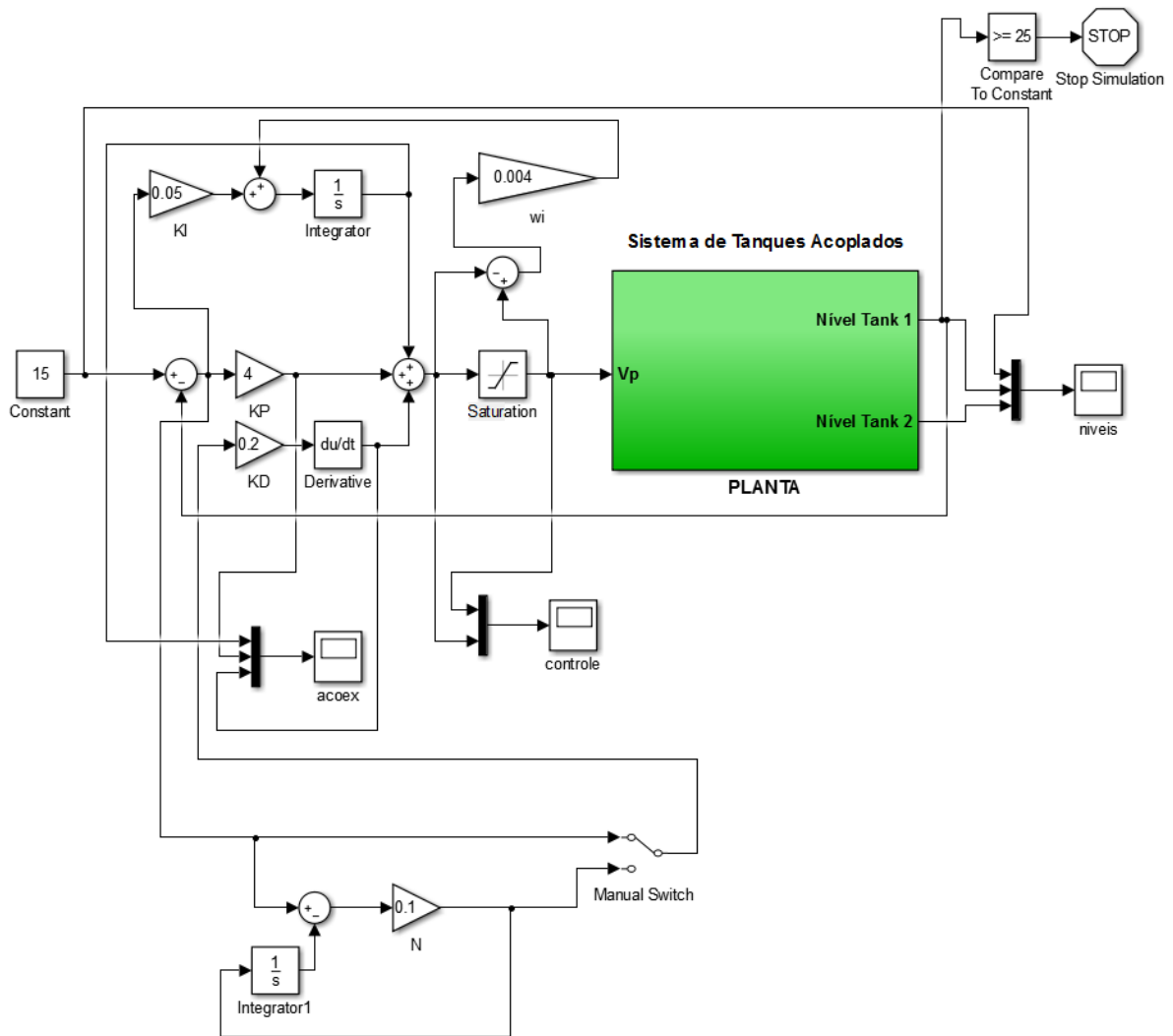
### 3.2.1 Simulação 1

O objetivo do primeiro experimento foi implementar diferentes controladores em um sistema de primeira ordem para controlar o nível de água em um tanque 1 e estabilizá-lo em 15 cm dentro de um período de 120 segundos. Os controladores utilizados foram Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativo (PD) e Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Além disso, foram considerados os efeitos dos filtros de Ação Derivativa e Anti-WindUp nos controladores PID, na figura 1 pode ser visto a planta completa com os filtros. Para poder fazer o experimento de cada controlador, apenas modificamos a planta da figura 1 usando técnicas como zerar o valor de um controlador ou desconectá-lo, como um switch que acionava ou não o filtro derivativo. Ou seja, como por exemplo, a montagem do Sistema com o PD possui o controlador PI com o seu valor zerado, assim temos um sistema com controlador apenas Proporcional-Derivativo, na montagem do sistema PID com os filtros, a chave determina quando eles estão ativados.

Para encontrar os melhores valores de ganho que proporcionassem um desempenho satisfatório do sistema, foi adotado o método de tentativa e erro em cada sessão de experimentos. Os resultados obtidos, incluindo os conjuntos de valores de ganho testados, foram registrados em prints da tela com os gráficos. Ao final dos experimentos, foi feita uma análise comparativa dos resultados e foi selecionado a imagem com os valores de ganho que produziu o melhor resultado para cada caso, ou seja, aquele que melhor estabilizou o nível de água no tanque 1 dentro do tempo estabelecido.

Essa abordagem experimental permitiu avaliar e comparar o desempenho dos diferentes controladores e determinar quais ajustes de ganho foram mais adequados para atingir o objetivo de controle do sistema. A partir desses resultados, é possível fazer ajustes adicionais ou refinamentos nos controladores para melhorar ainda mais o desempenho do sistema de controle.

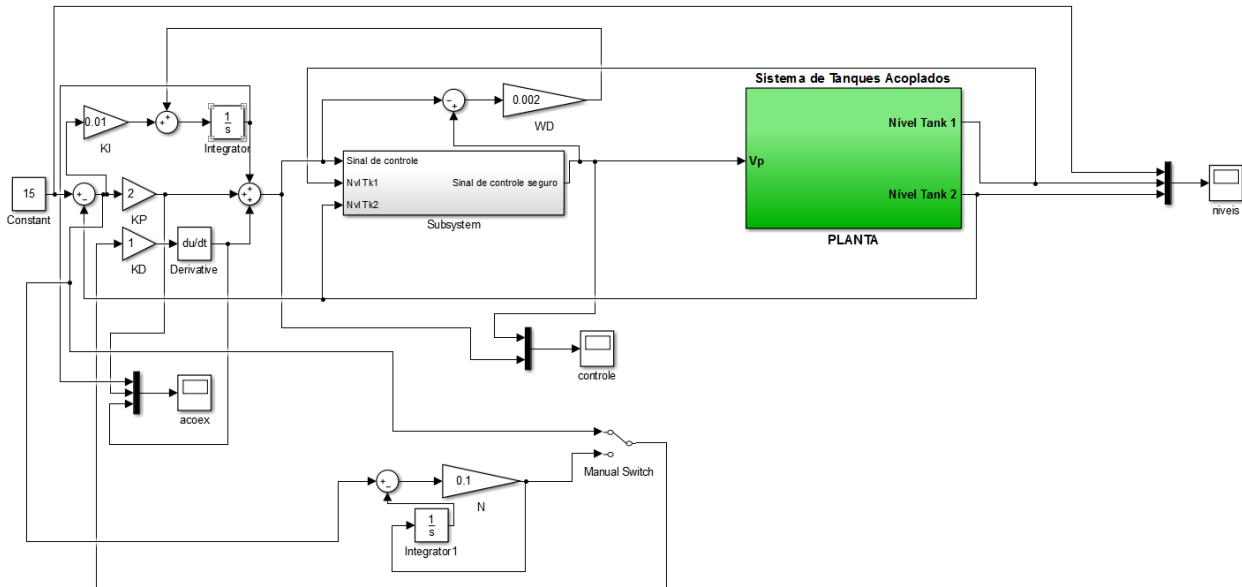
Figura 1: Planta completa da simulação 1.



### 3.2.2 Simulação 2

No segundo experimento, seguindo uma abordagem semelhante ao experimento anterior, foram utilizados os mesmos controladores, Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativo (PD) e Proporcional-Integral-Derivativo (PID); e os filtros de Ação Derivativa e Anti-WindUp no controlador PID. No entanto, dessa vez o foco foi em um sistema de segunda ordem com o propósito de controlar o nível de água do tanque 2. A figura 2 demonstra a planta para realização de todos os experimentos desta segunda parte. Seguindo a mesma abordagem de apenas retirar o efeito dos controladores, que não iriam contribuir para o experimento em determinadas ocasiões, e desligar os filtros para fazer o estudo em controladores diferentes, e, também, observar seus efeitos quando ligados ao PID.

Figura 2: Planta completa da simulação 2.

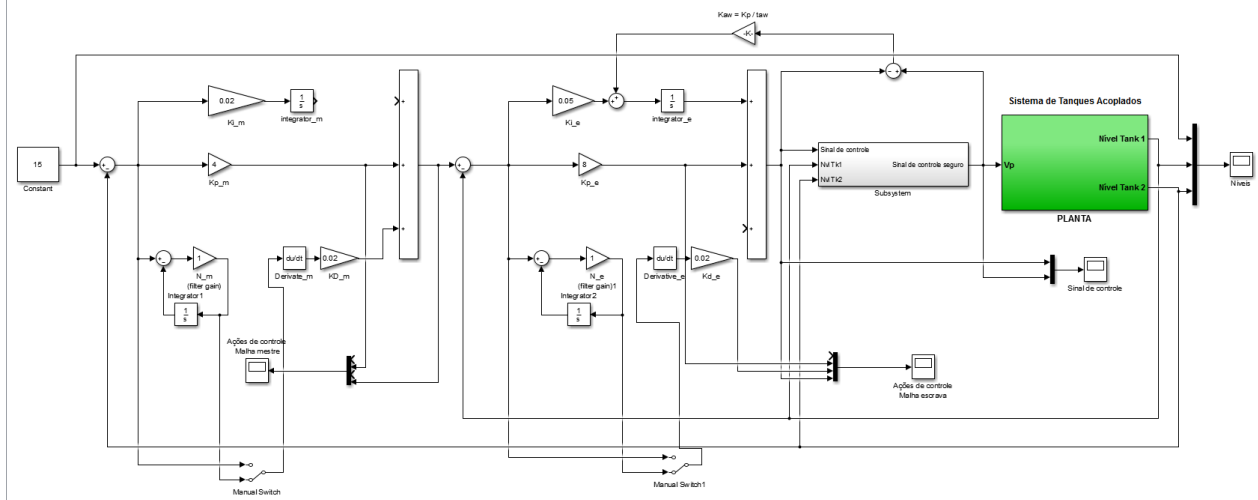


### 3.2.3 Simulação 3

Na terceira e última simulação, o objetivo foi implementar um controle em cascata (figura 3) para regular o nível do tanque 2. Nesse experimento, foram utilizadas duas malhas de controle, permitindo testar várias combinações de controladores, assim como nas simulações anteriores os controladores usados foram os Proporcional (P), Proporcional-Integral (PI), Proporcional-Derivativo (PD) e Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Para determinar a configuração e os valores que proporcionassem o melhor desempenho do sistema foram testadas diferentes combinações de controladores. Isso incluiu a utilização de controladores P com P, PI com PD, PD com PI, PID com PID, PID com PI e assim por diante. Cada combinação representava uma estratégia única para controlar o nível do tanque 2 por meio de duas malhas de controle em cascata.

Ao testar essas combinações, foram analisados o desempenho e a eficiência do sistema em atingir o objetivo desejado. Foram considerados critérios como estabilidade, tempo de resposta, suavidade da resposta, precisão do controle e capacidade de rejeitar perturbações.

Figura 3: Planta completa da simulação 3.





## 4 RESULTADOS

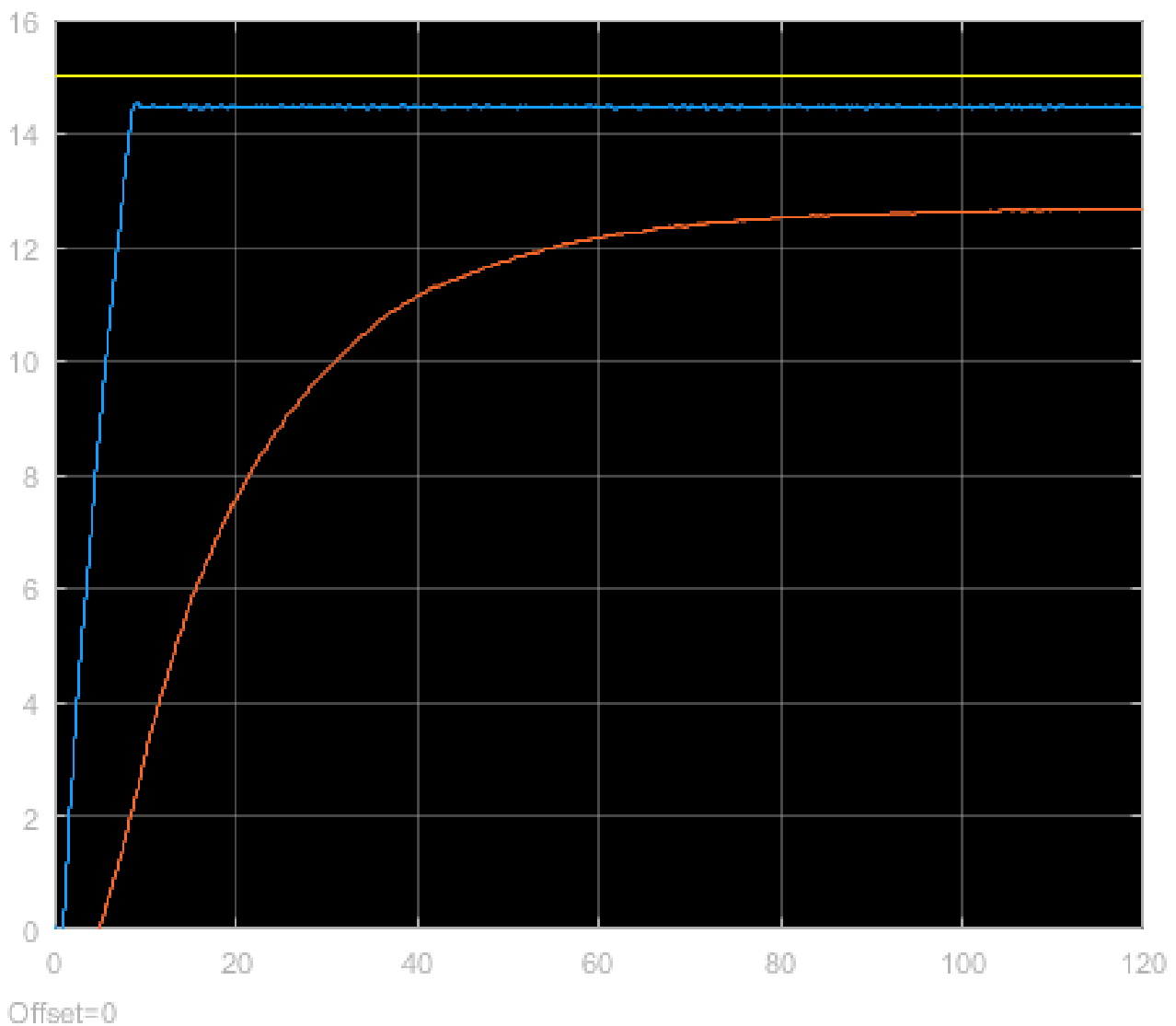
Os resultados estão apresentados em forma de gráficos e tabelas, que mostram o comportamento do sistema ao longo do tempo, bem como as medições realizadas

### 4.1 Simulação 1 - Sistemas de Primeira Ordem

#### 4.1.1 Controle Proporcional (P) de Primeira Ordem

Na simulação apenas com o controlador proporcional (P), Avaliando a resposta do sistema em relação ao setpoint. Observamos que levou cerca de 10 segundos para atingir o setpoint, não havendo a presença de oscilações ou sobrelevação (overshoot)

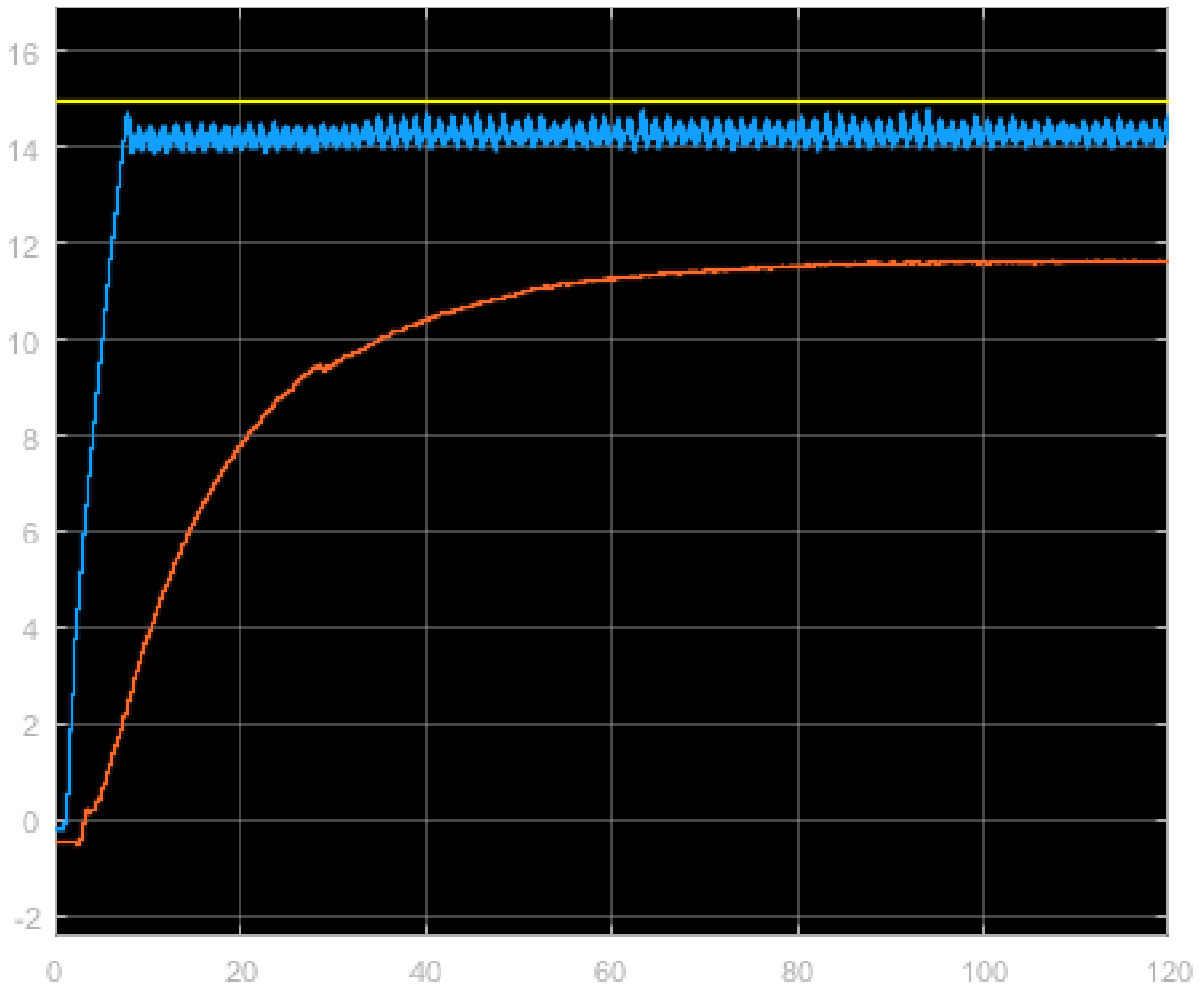
Figura 4: controlador Proporcional (P)



#### 4.1.2 Controle Proporcional-Derivativo (PD) de Primeira Ordem

O controlador PD pode ajudar a variável a atingir o setpoint mais rapidamente em comparação a um controlador proporcional simples (P). No entanto, é importante observar que o controle derivativo também pode aumentar a sensibilidade do sistema a ruídos e perturbações, podendo levar a oscilações indesejadas e instabilidades se o ganho derivativo não for adequadamente ajustado. E isso pode ser nitidamente percebido na figura 5

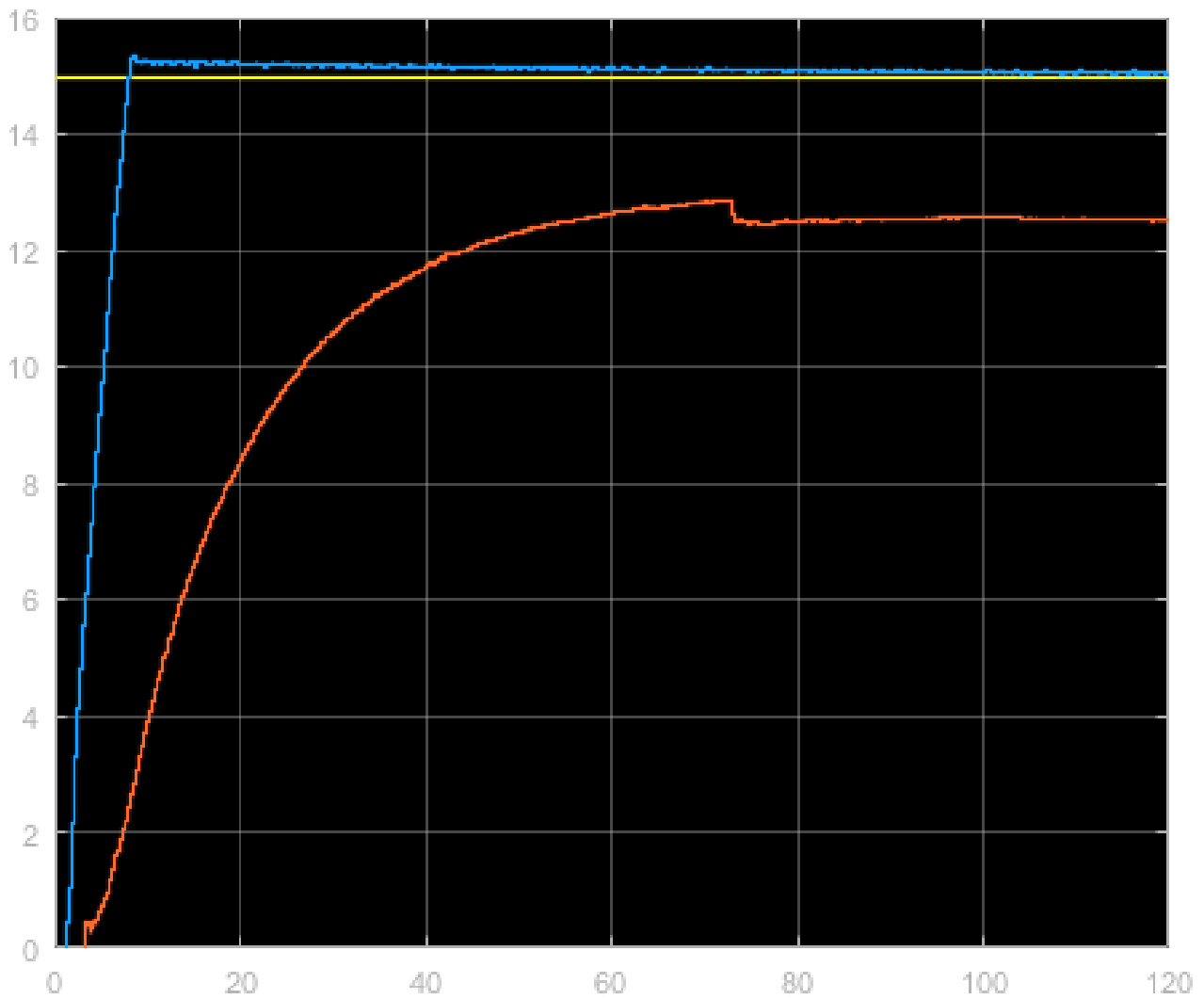
Figura 5: controlador Proporcional-Derivativo (PD)



#### 4.1.3 Controle Proporcional-Integral (PI) de Primeira Ordem

o controlador PI é capaz de controlar a variável em relação ao setpoint de forma precisa, como é possível observar o nível do tanque chegando de forma mais rápida ao valor desejado. Além disso, por conta da ação integral, houve a presença de um overshoot.

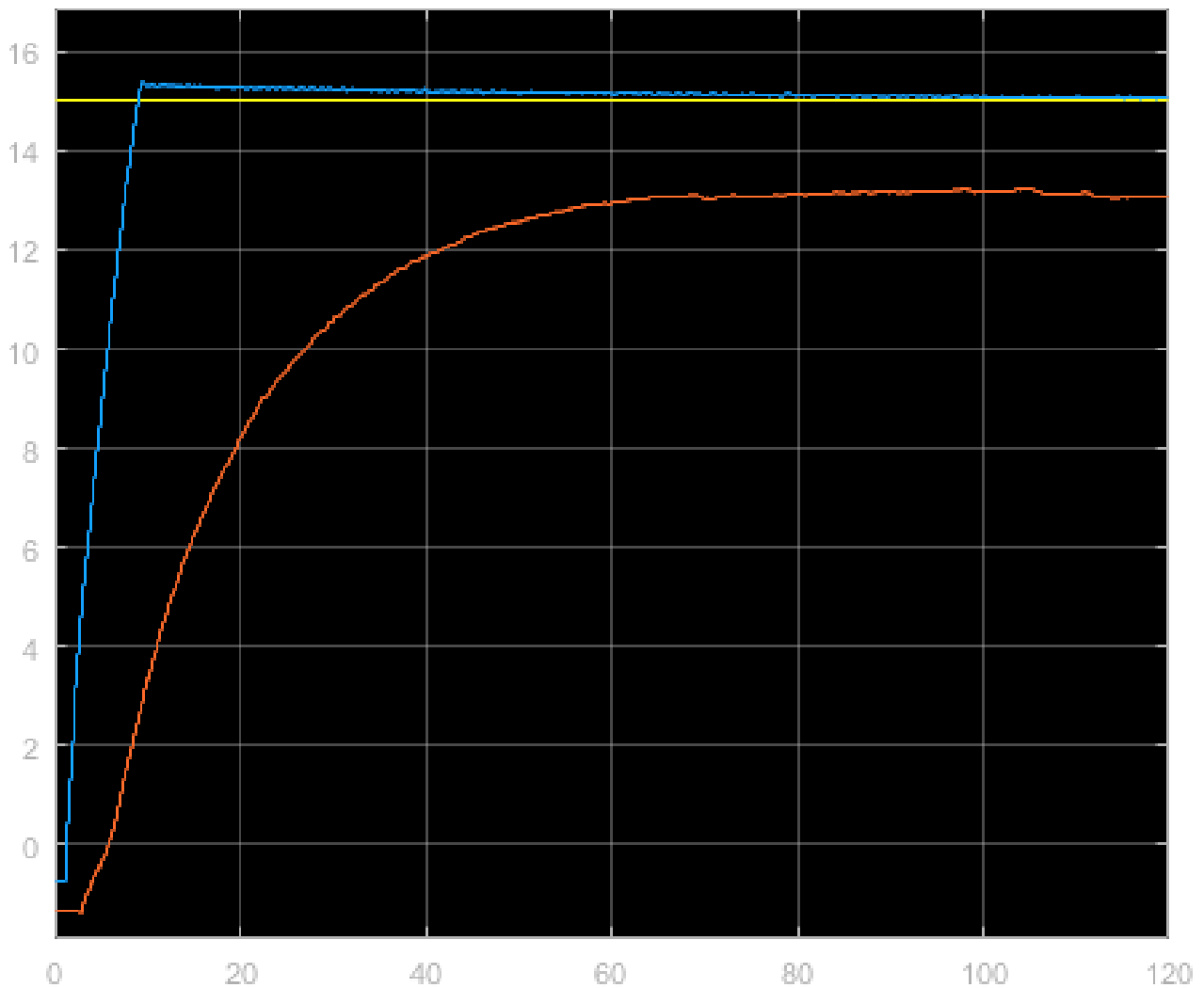
Figura 6: controlador Proporcional-Integral (PI)



#### 4.1.4 Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) de Primeira Ordem

O controlador PID exibiu um perfil de resposta semelhante ao controlador PI, com a diferença de que a presença do componente derivativo ( $K_d$ ) introduziu um maior ruído na resposta do sistema. No entanto, após o overshoot, a curva do sistema se estabilizou de maneira mais suave no valor do setpoint. Ou seja, o controlador PID oferece uma combinação de ação proporcional, integral e derivativa, proporcionando uma resposta rápida inicial, correção de erros acumulados e uma estabilização suave após o overshoot.

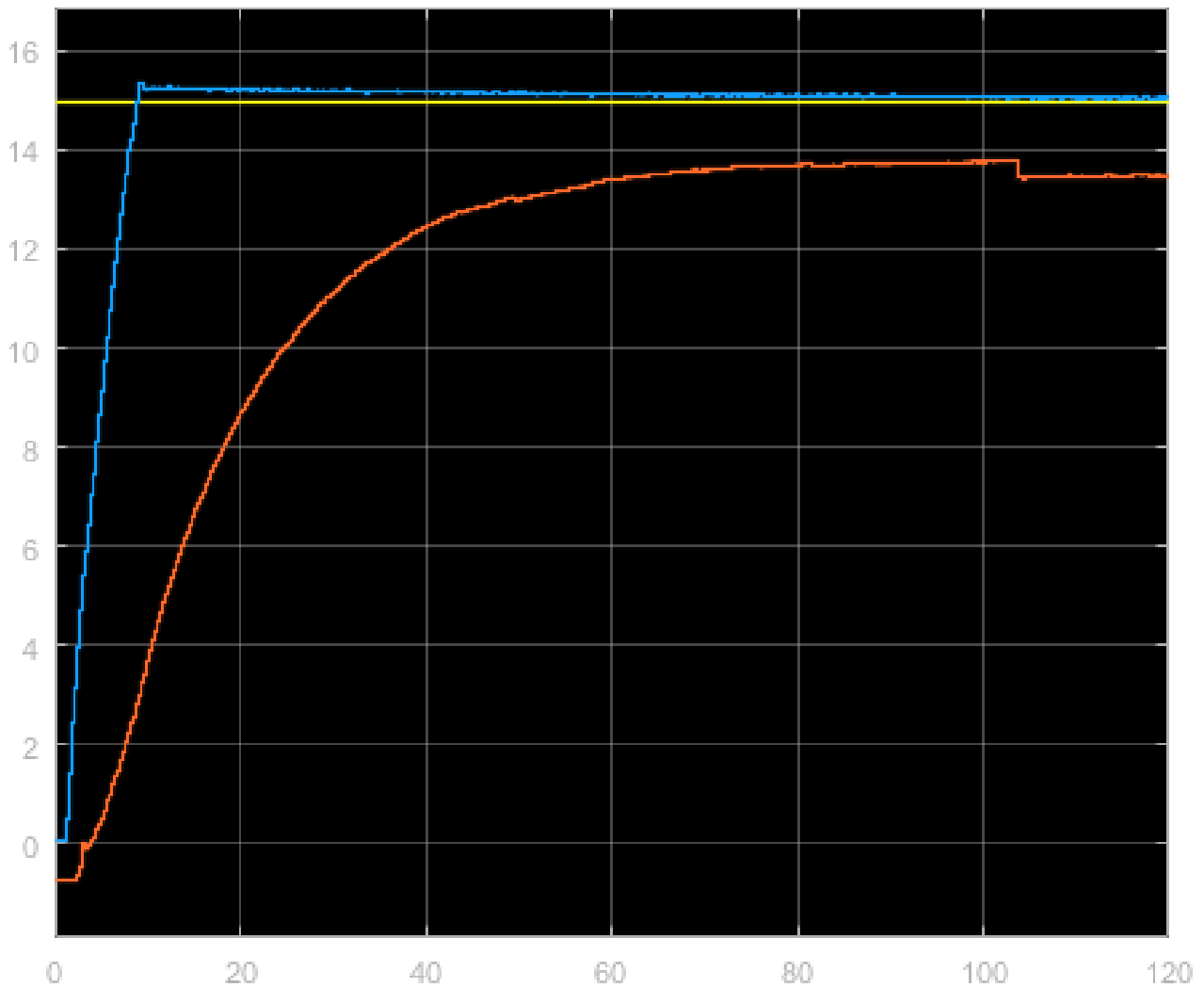
Figura 7: controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



#### 4.1.5 Controle PID de Primeira Ordem com Filtro na Ação Derivativa

Afim de melhorar o ruído causado pela ação derivativa, foi inserido um filtro no controlador derivativo permitindo um controle mais preciso e estável. Apesar de ainda aparecer ruído, houve uma melhora com relação a sua intensidade.

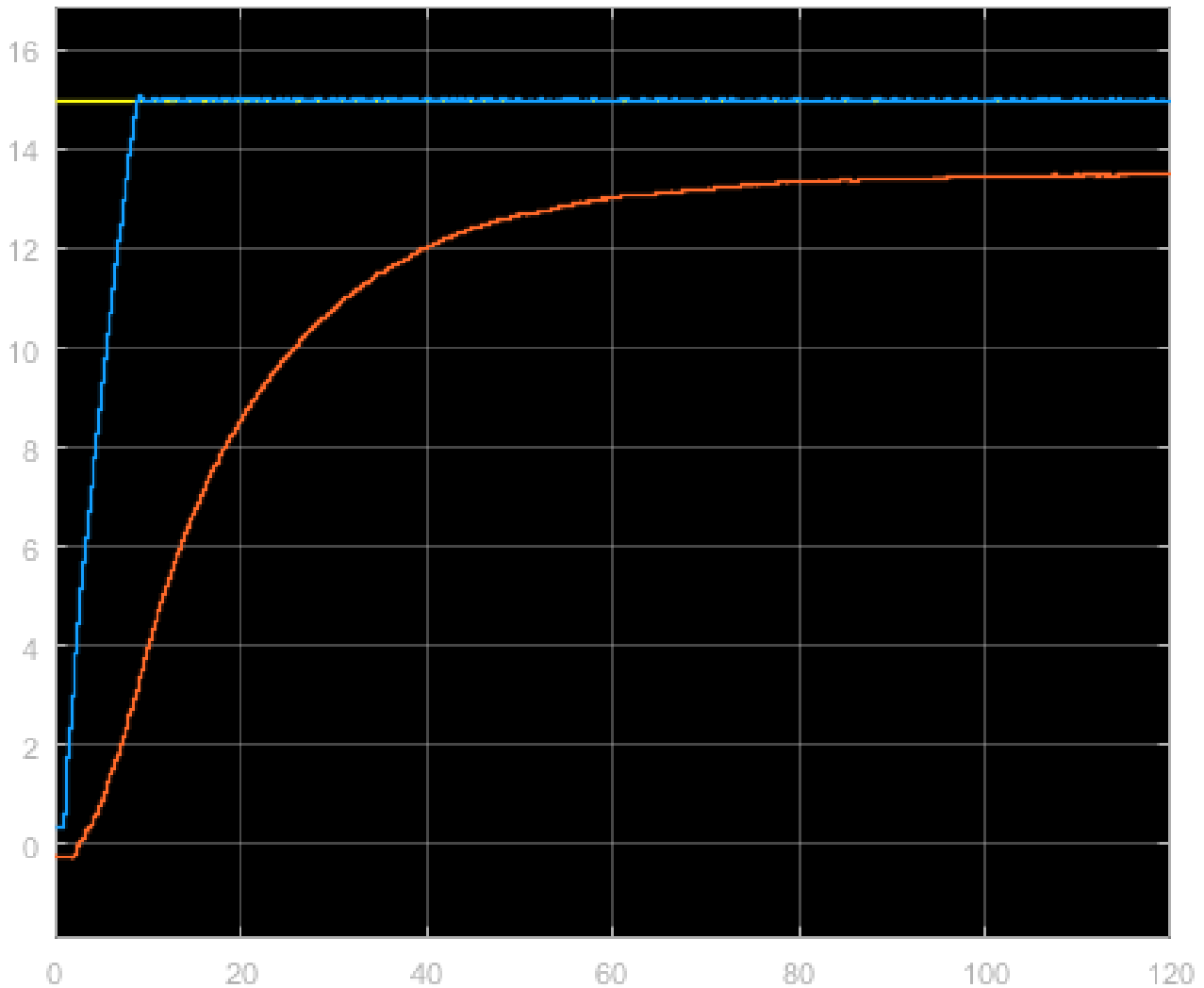
Figura 8: controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com Filtro na Ação Derivativa



#### 4.1.6 Controle PID de Primeira Ordem com Filtro na Ação Integral (Anti-Reset Windup)

Com a inclusão do filtro na ação integral, é possível alcançar um melhor compromisso entre a correção do erro em regime permanente e a redução do overshoot durante a resposta transitória. Isso resulta em um comportamento mais estável e preciso do sistema de controle. Podemos perceber na figura 9 um resultado excelente, com uma estabilização mais rápida que as anteriores sem a ocorrência do overshoot.

Figura 9: controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com Filtro na Ação Integral (Anti-Reset Windup)

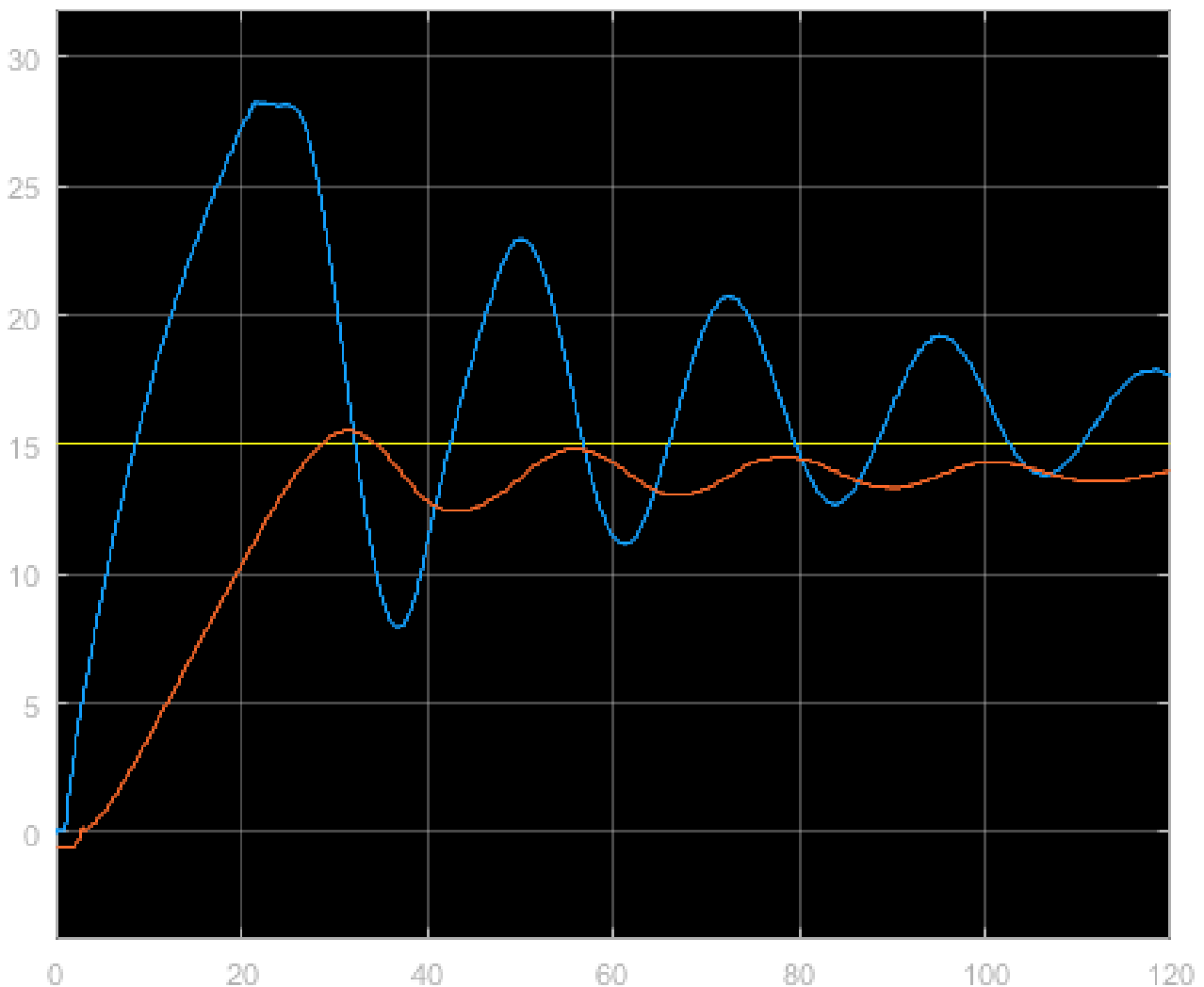


## 4.2 Simulação 2 - Sistemas de Segunda Ordem

### 4.2.1 Controle Proporcional (P) de Segunda Ordem

Durante a simulação utilizando apenas o controlador proporcional (P), foram realizados experimentos para avaliar o efeito do aumento do ganho proporcional ( $K_p$ ) no desempenho do sistema de controle. Observou-se que, ao aumentar o valor do ganho proporcional, houve uma redução no erro entre a saída real do sistema e a saída desejada. Isso indica que o aumento do  $K_p$  possibilitou um melhor ajuste do controlador proporcional em relação ao objetivo de manter o nível do tanque 2 estável. No entanto, essa mudança também resultou em um aumento das oscilações no tanque 1.

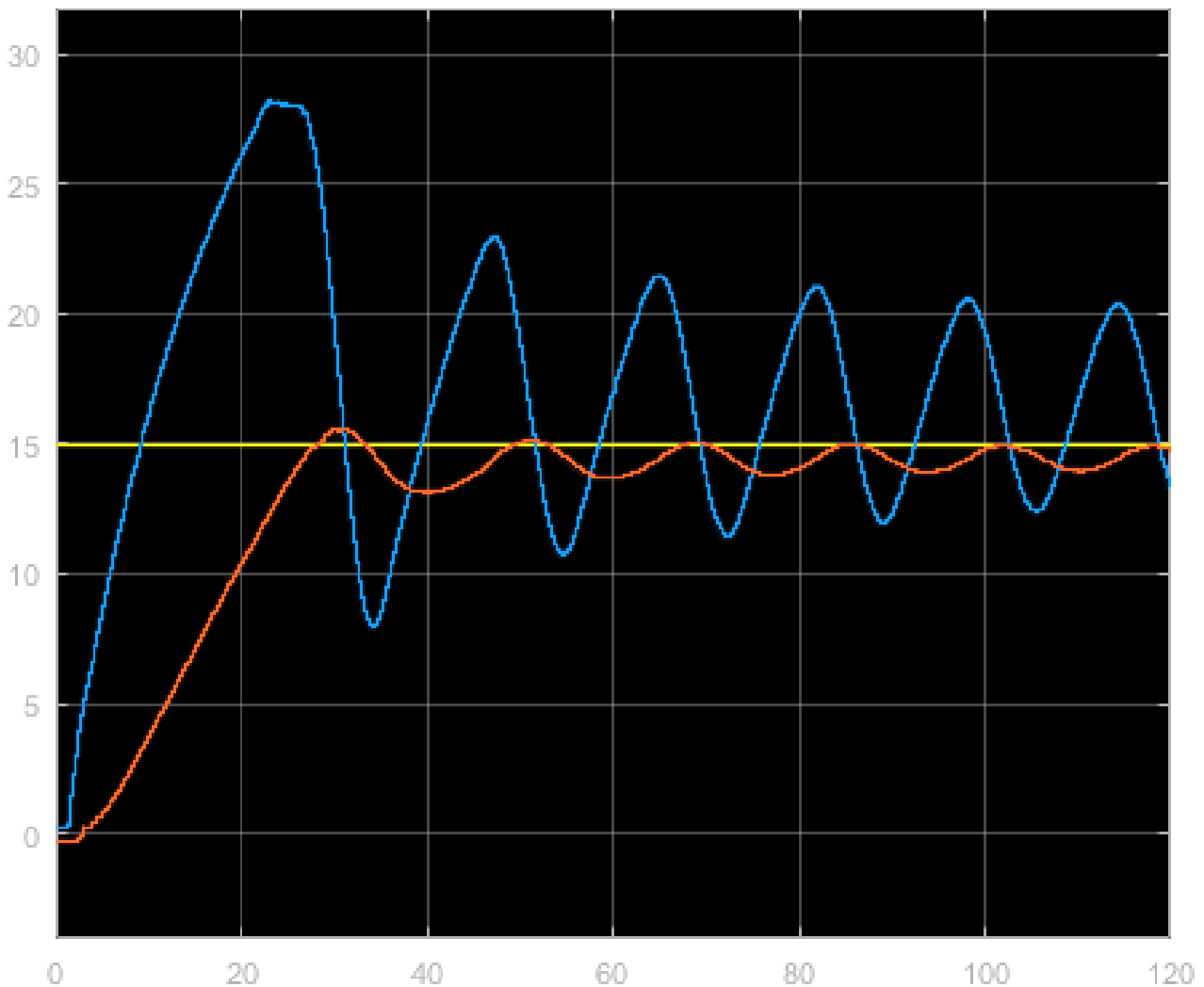
Figura 10: Controlador Proporcional (P)



#### 4.2.2 Controle Proporcional-Derivativo (PD) de Segunda Ordem

Da mesma forma que no controle PD de primeira ordem, foi observado que o sistema apresenta uma maior suscetibilidade ao ruído quando utilizando esse tipo de controlador. Isso significa que o sinal de saída do sistema está mais propenso a flutuações e variações indesejadas, resultantes de interferências e ruídos presentes no ambiente. A figura 11 ilustra essa diferença.

Figura 11: controlador Proporcional-Derivativo (PD)





### 4.2.3 Controle Proporcional-Integral (PI) de Segunda Ordem

Analisando o controlador PI, foi observado que aumentar o valor do ganho integral ( $K_i$ ) resultou em um maior overshoot no tanque 1, que por sua vez, levou a um maior overshoot no tanque 2. Esses overshoots indicam que o sistema respondeu de forma mais agressiva e ultrapassou o valor desejado antes de estabilizar conforme as figuras 12 e 13.

Além disso, constatou-se que o controlador PI proporcionou um erro menor em comparação com o controlador P. Isso significa que o controlador PI foi mais eficiente em reduzir a diferença entre a saída real e a saída desejada, resultando em um melhor desempenho de controle em termos de precisão.

Figura 12: controlador Proporcional-Integral (PI)

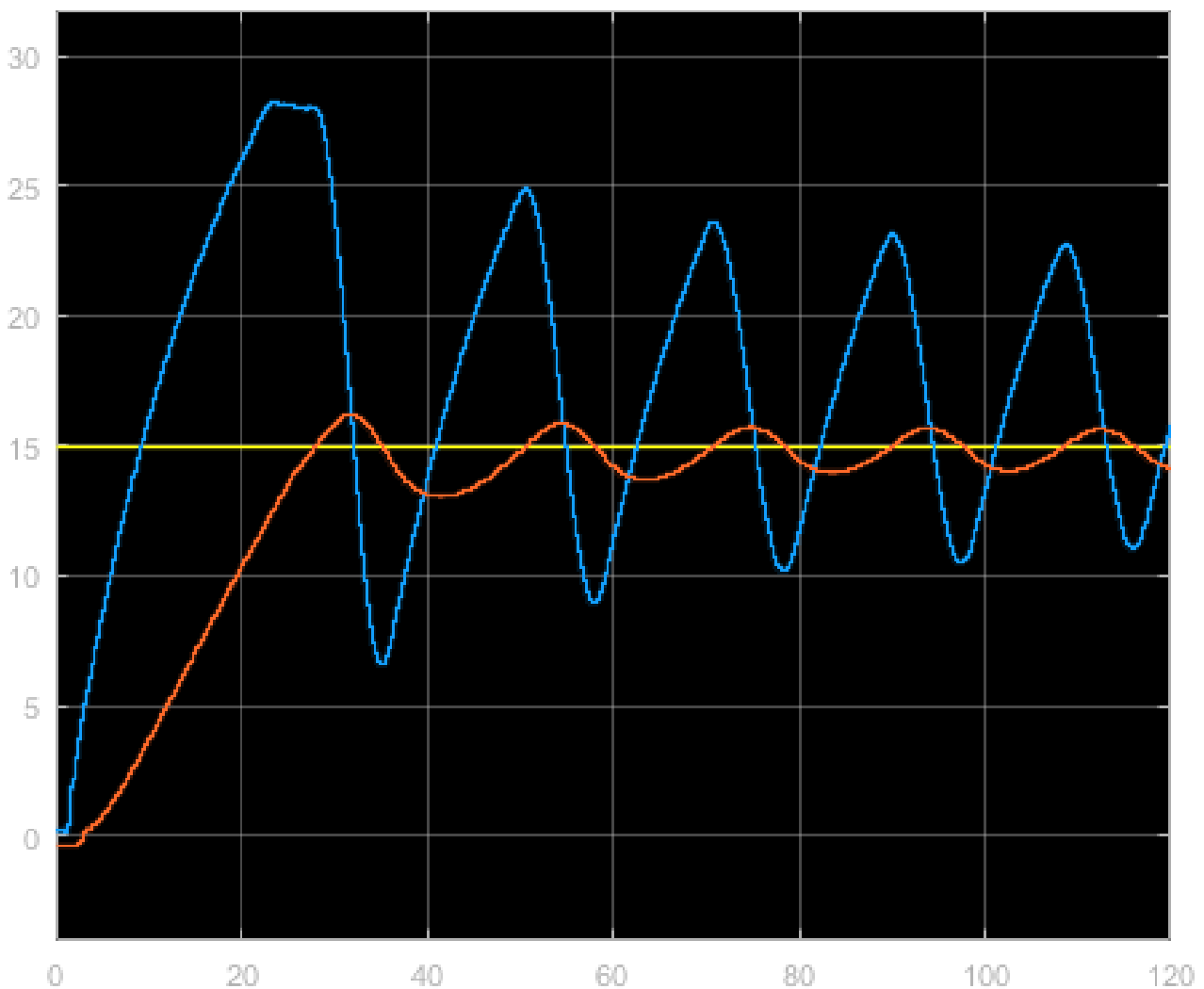
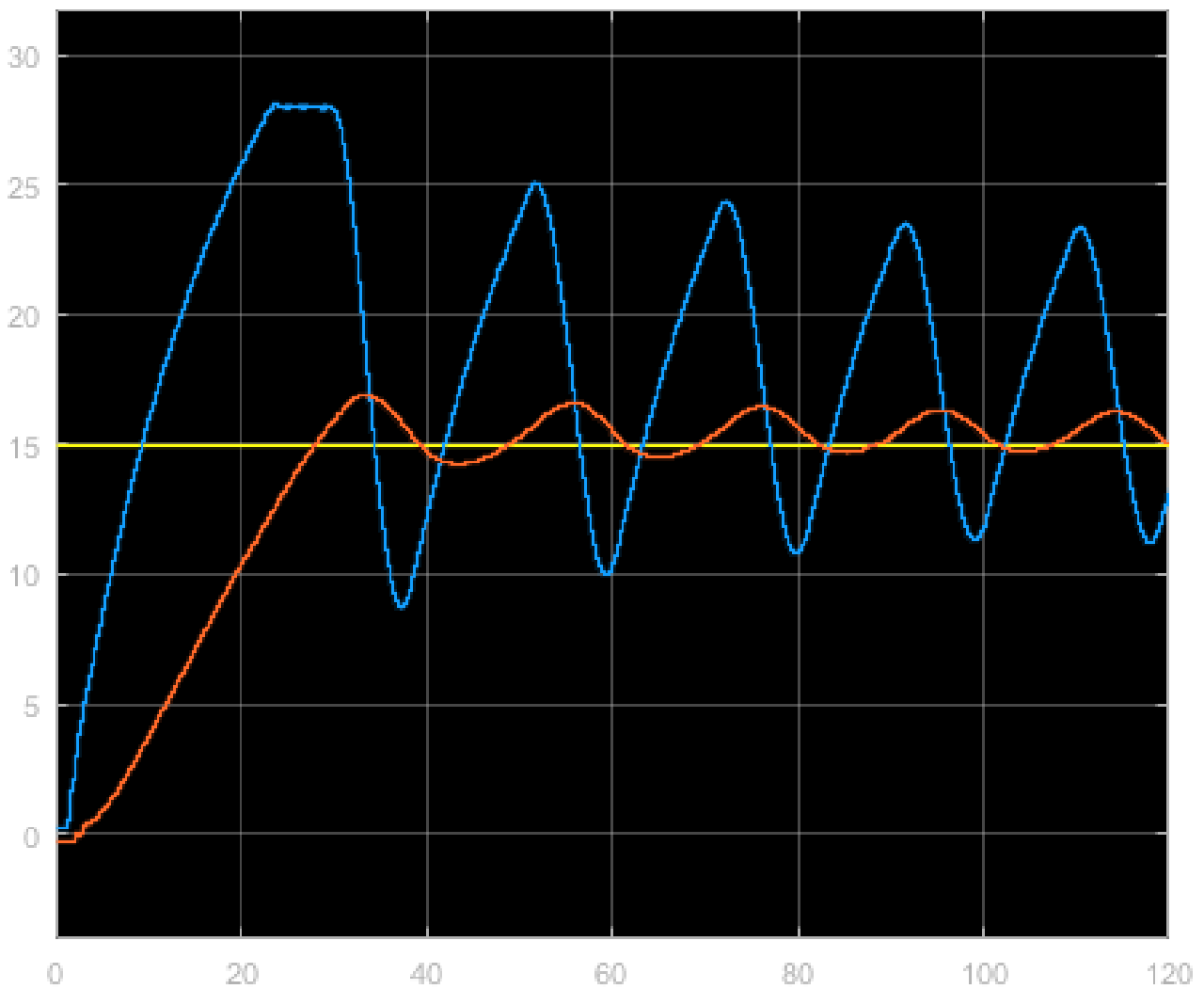


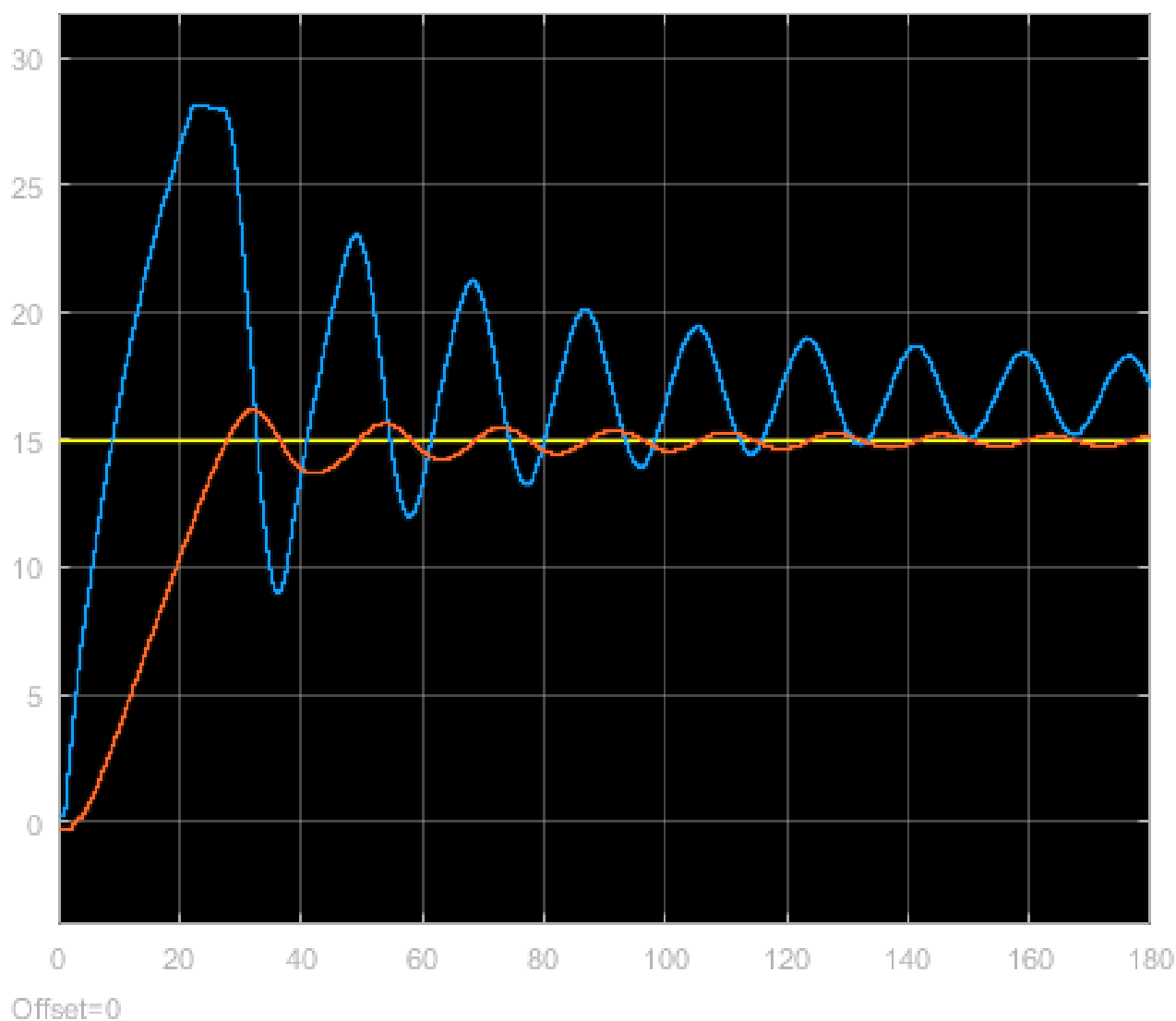
Figura 13: controlador Proporcional-Integral (PI) com  $K_i$  maior



#### 4.2.4 Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) de Segunda Ordem

Na análise do controlador PID (figura 14), identifica-se que o controle PID de segunda ordem oferece uma resposta mais precisa e rápida em relação aos controladores P, PI e PD. O resultado pode ser considerado ótimo em termos da estabilização, não demorando tanto como os controladores derivativo e integral, demonstrando a importância da ação conjunta dos controladores, diminuindo o tempo de estabilidade e sobressinal.

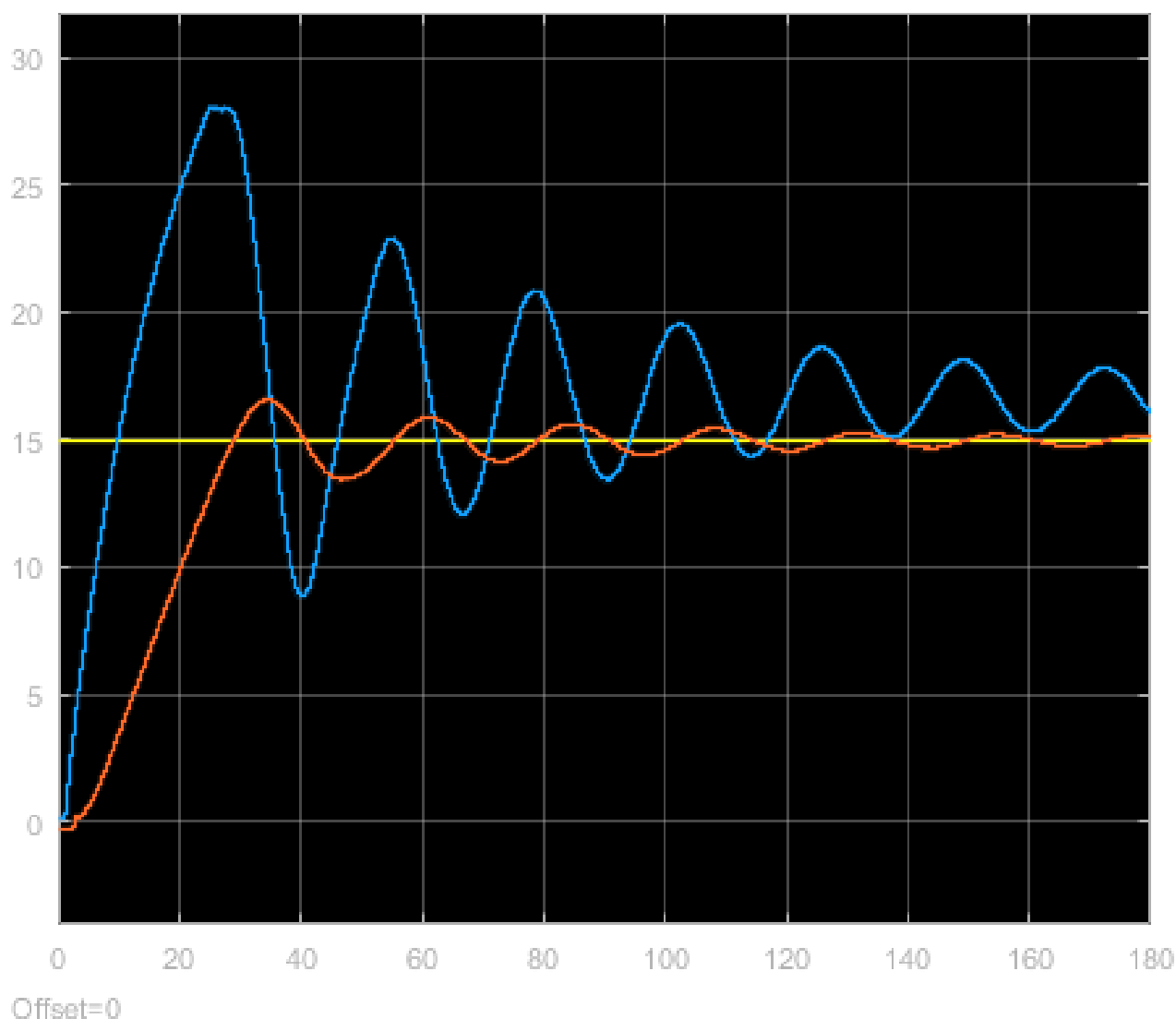
Figura 14: controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



#### 4.2.5 Controle PID de Segunda Ordem com Filtro na Ação Derivativa

Ao aplicar o filtro derivativo no sistema anterior (figura 14), é verificado que a redução do ruído também gerou uma menor oscilação durante a estabilização (figura 15). A redução bastante significativa do ruído pode ser notada comparando as imagens da figura 16

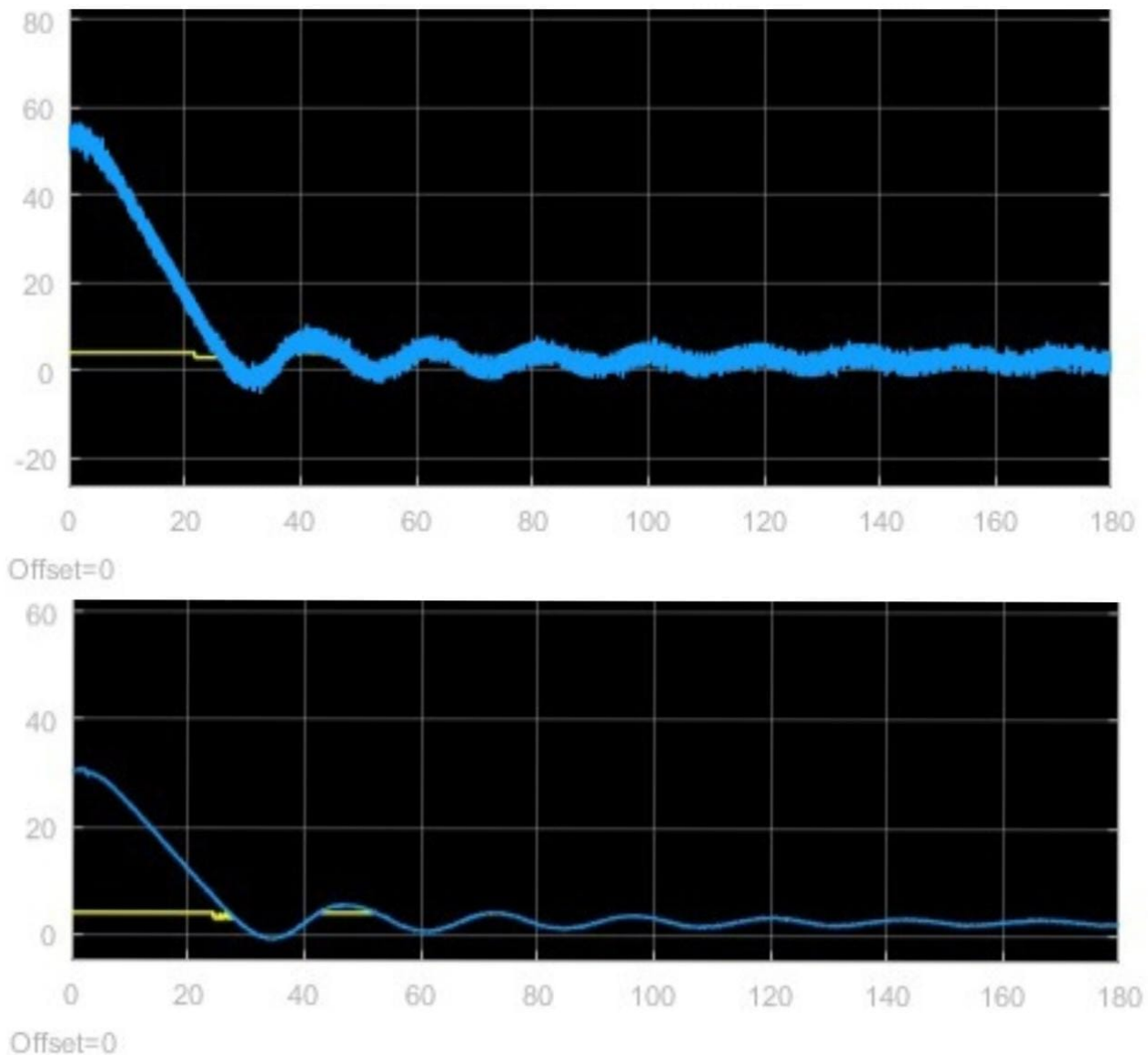
Figura 15: controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com Filtro na Ação Derivativa



#### 4.2.6 Diferença no PID com Filtro na Ação Derivativa

A utilização de um filtro na ação derivativa tem o benefício de melhorar a resposta transitória do sistema de controle, reduzindo oscilações indesejadas causadas por ruídos e flutuações melhorando sua estabilidade. Diferente da simulação 1, na qual no gráfico de níveis é possível identificar facilmente a diminuição do ruído, nos gráficos anteriores é um pouco menos notório, com isso, o grande feito do filtro pode ser notada no gráfico de controle abaixo:

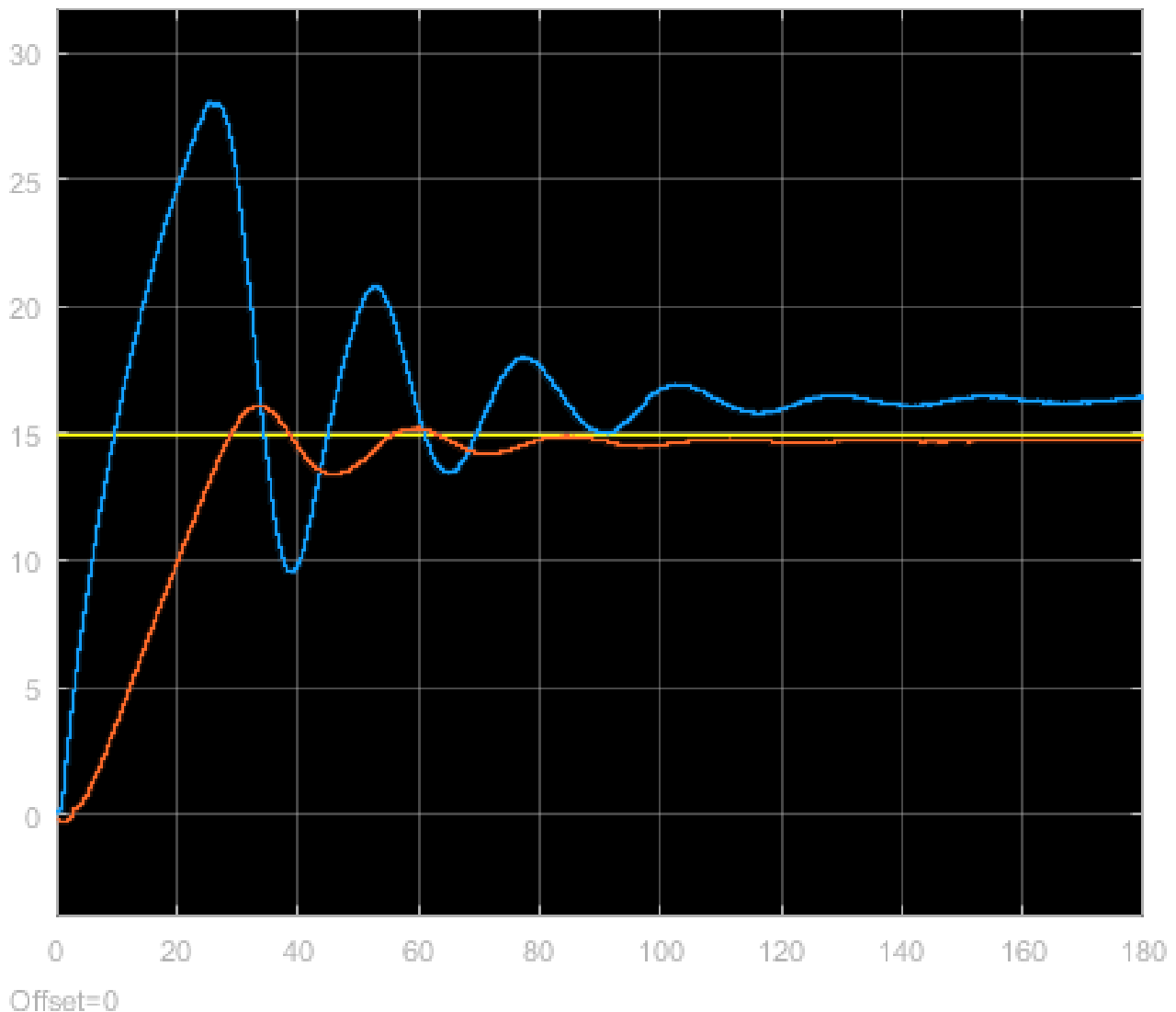
Figura 16: Presença de Ruído sem filtro X com filtro



#### 4.2.7 Controle PID de Segunda Ordem com Filtro na Ação Integral (Anti-Reset Windup)

Comparado aos controladores PID convencionais, o controle PID de segunda ordem com filtro na ação integral oferece algumas vantagens. Ele reduz significativamente o problema do Windup, garantindo uma resposta mais estável e controlada quando o sistema opera em condições de saturação. Isso resulta em um melhor desempenho e maior precisão do sistema de controle. A figura 17 mostra o PID com filtro na ação integral e seu comportamento de atingir de forma mais rápida sua estabilidade em comparação aos outros PID apresentados.

Figura 17: controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) com Filtro na Ação Integral (Anti-Reset Windup)



### 4.3 Simulação 3 - Controle em Cascata

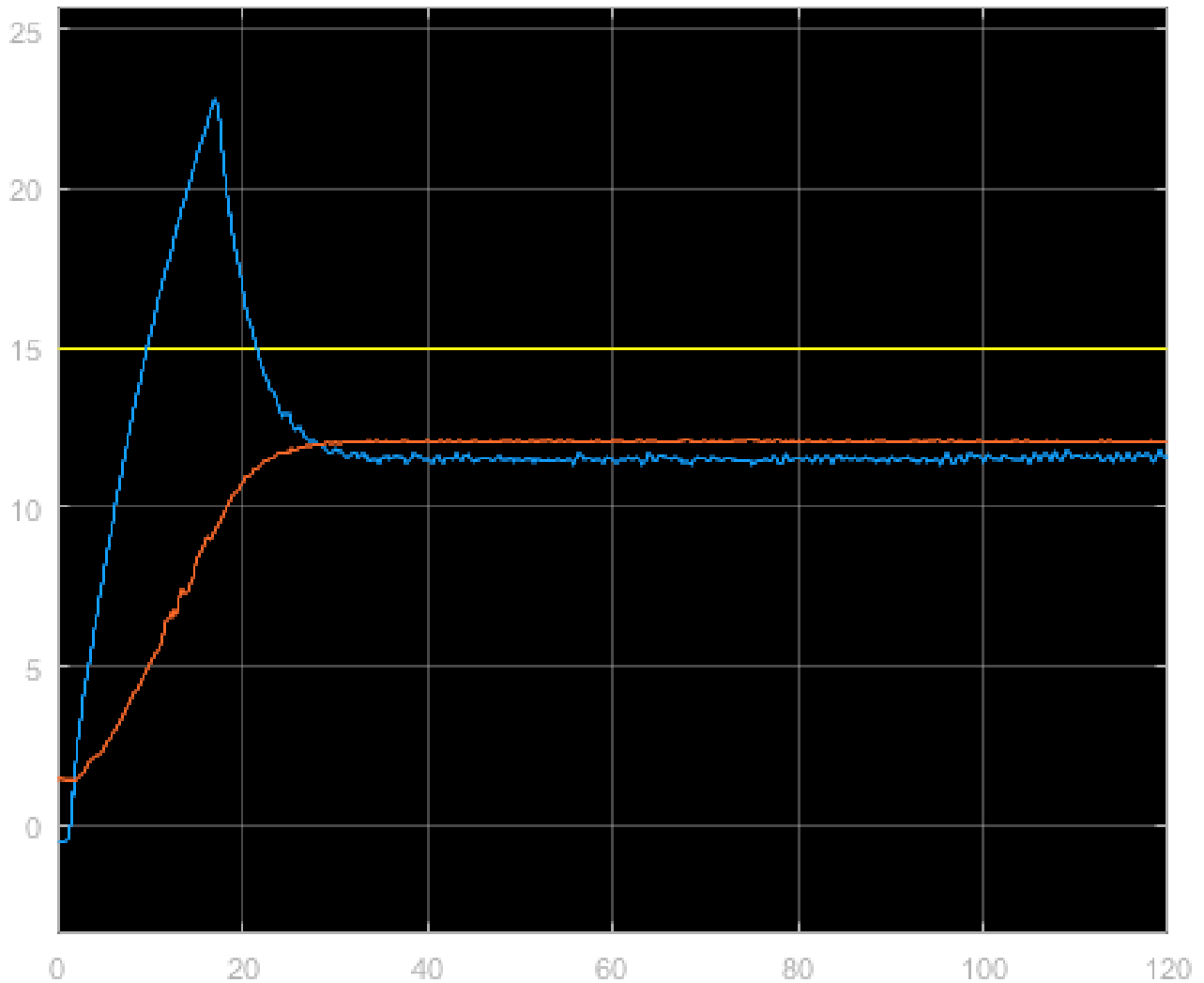
#### 4.3.1 Controlador primário - Proporcional / Controlador secundário - Proporcional

Os controladores proporcionais foram empregados em ambos os sistemas de controle com o objetivo de obter os melhores valores possíveis para os ganhos proporcionais. No entanto, foi observado um erro em regime permanente significativo com esses valores de  $K_p$ . Para analisar a evolução do comportamento do sistema nessa configuração, foi dobrado os valores de  $K_p$  dos controladores no segundo teste.

No entanto, o nível do tanque 2 continua distante do valor de referência, como pode ser constatado na Figura 18. Além disso, verificou-se uma instabilidade do sistema com base nos níveis dos tanques. A oscilação no nível do tanque 1 é causada pela variação abrupta no sinal de controle, ou seja, os valores de tensão enviados para a bomba apresentam flutuações acentuadas, o que pode pre-

judicar o desempenho do atuador do sistema de controle. Isso ocorre devido ao fato de que apenas o uso do controle proporcional não é suficiente para alcançar o nível desejado no tanque 2.

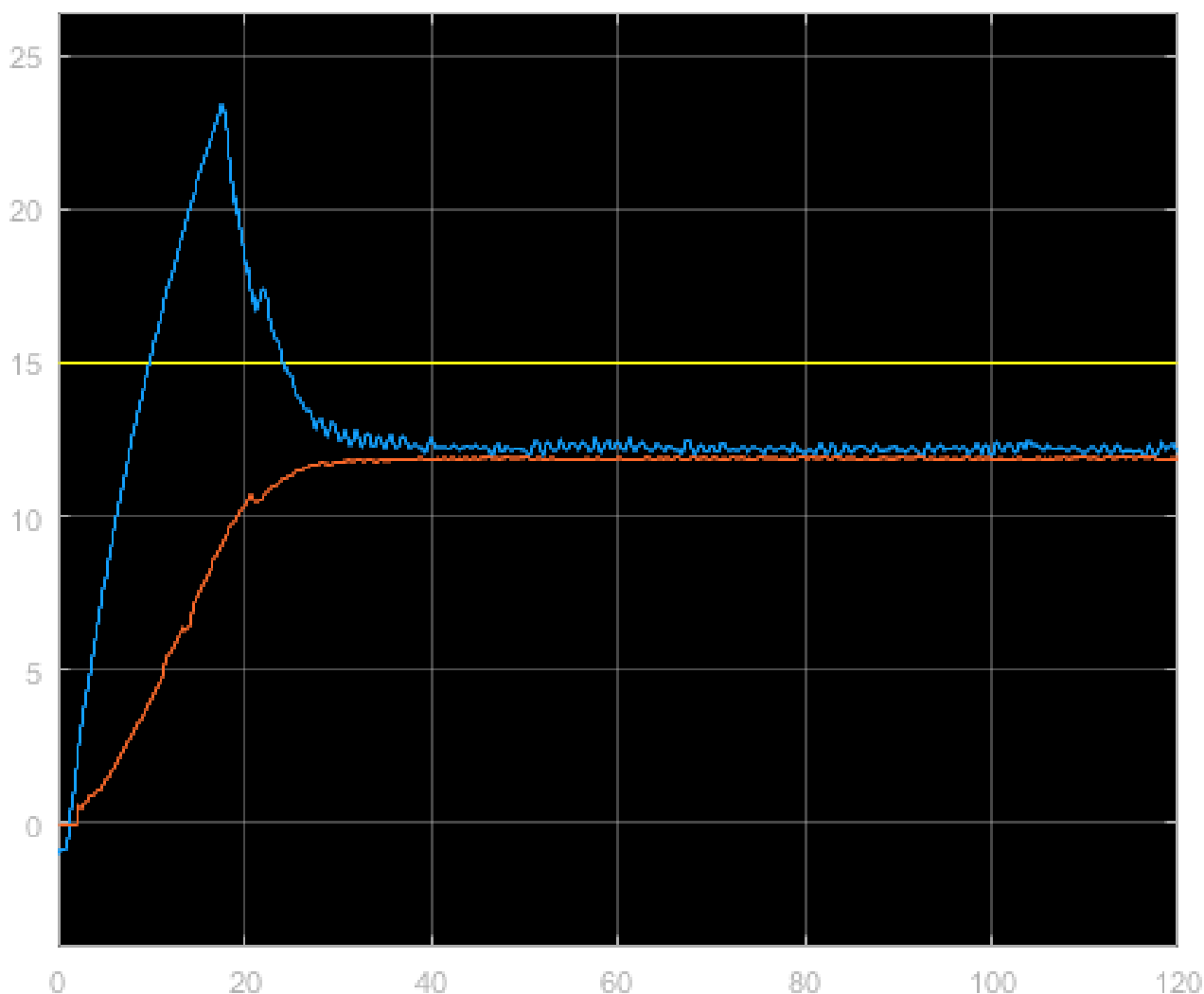
Figura 18: Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional derivativo - Proporcional derivativo)



#### 4.3.2 Controlador primário - Proporcional Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Derivativo

A utilização do controlador proporcional-derivativo em ambos os sistemas de controle resultou em um aumento do erro de regime, com uma maior presença de ruído. Na figura 19, observa-se que o nível do tanque 2 continuou distante do valor de referência, e o sinal de controle ainda apresentou bastante ruído, o que resultou em oscilações nos níveis dos tanques. Embora seja possível reduzir o ruído utilizando um filtro derivativo, de forma geral, a configuração com dois controladores proporcionais-derivativos não se mostrou satisfatória.

Figura 19: Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional - Proporcional)

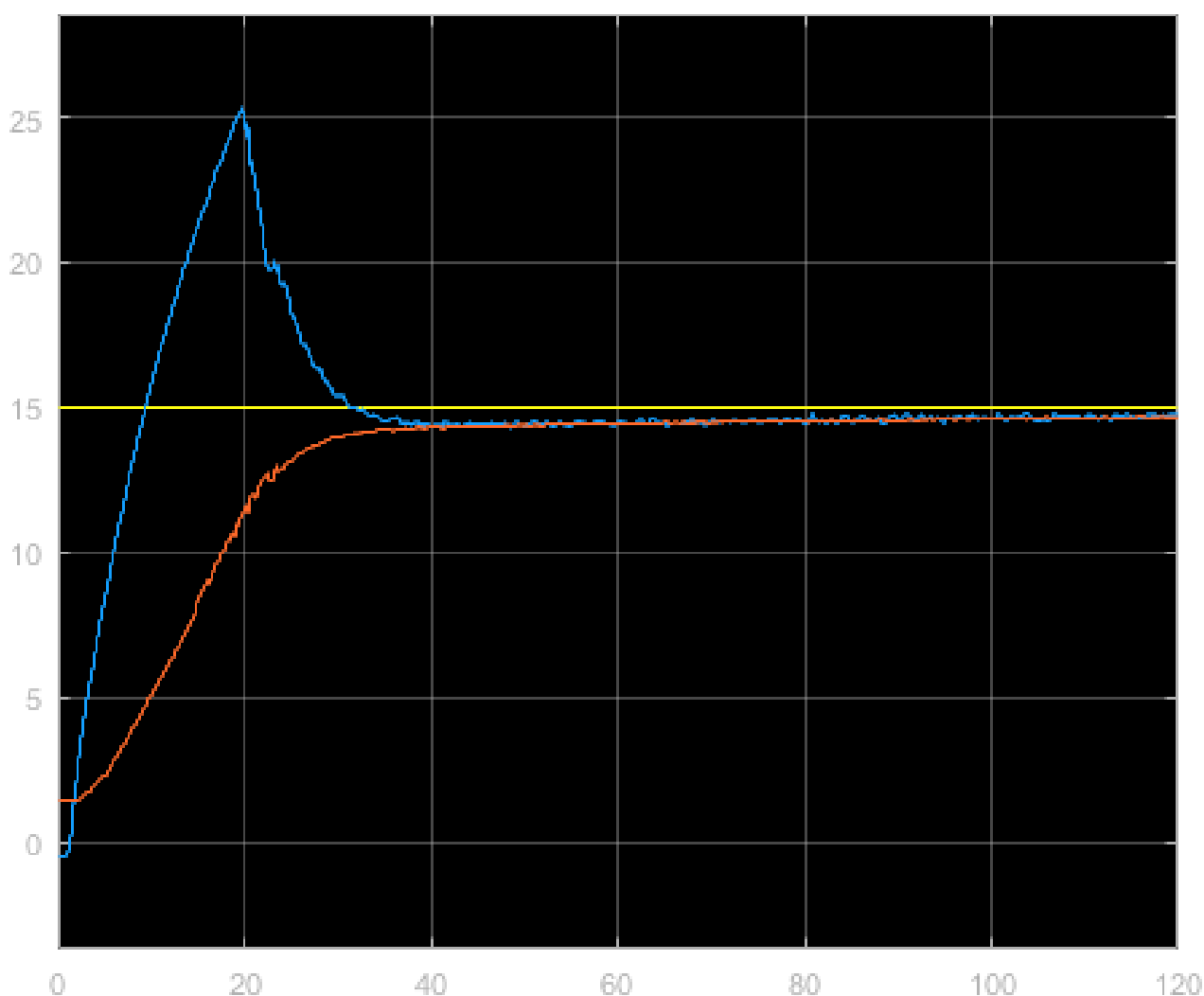




#### 4.3.3 Controlador primário - Proporcional Integrativo / Controlador secundário - Proporcional Integrativo

Ao empregar controladores em que ambos estão configurados com ação proporcional integrativo (figura 20), obteve-se um notável aprimoramento no controle do nível do tanque 2, com ênfase no regime permanente. Nessa fase, o nível do tanque demonstrou uma redução significativa no erro de regime em comparação aos controles prévios, indicando uma maior estabilidade e precisão no processo de controle.

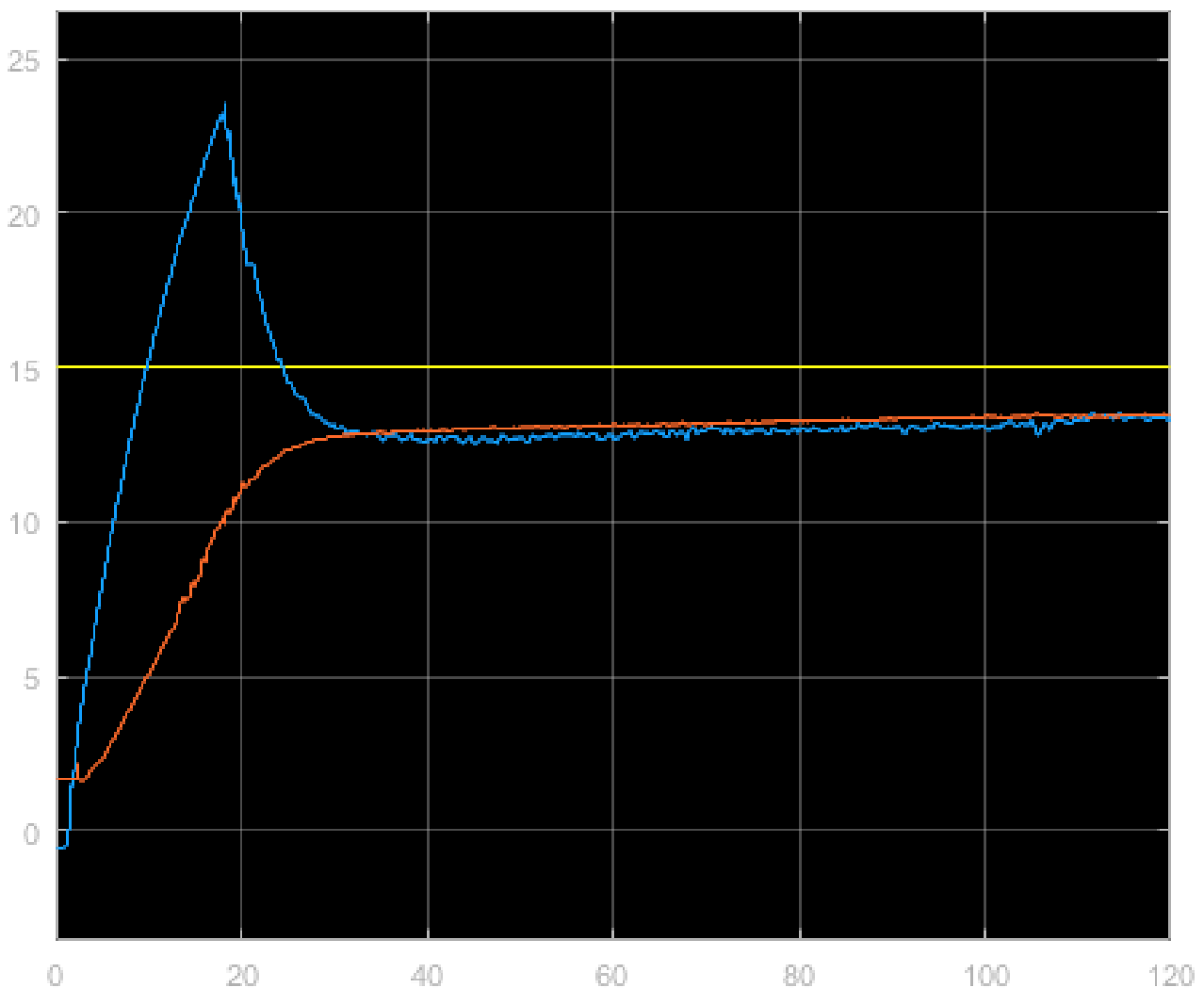
Figura 20: Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional integrativo - Proporcional integrativo)



#### 4.3.4 Controlador primário - Proporcional Integrativo / Controlador secundário - Proporcional Derivativo

No teste realizado com um controlador proporcional-integrativo no controlador primário e um controlador proporcional-derivativo no controlador secundário (figura 21). O sistema apresentou um erro em regime permanente elevado, houve instabilidade no sinal de controle e o tempo necessário para a estabilização do sistema foi longo. Ou seja, o nível do tanque 2 durante o regime permanente foi mantido em um valor menor em comparação com o caso do controlador PD-PD e P-P. No entanto, ficou mais distante do valor de referência em comparação com o caso do controlador PI-PI. A configuração assim, demonstrando-se também não ser ideal para o sistema de tanques utilizado.

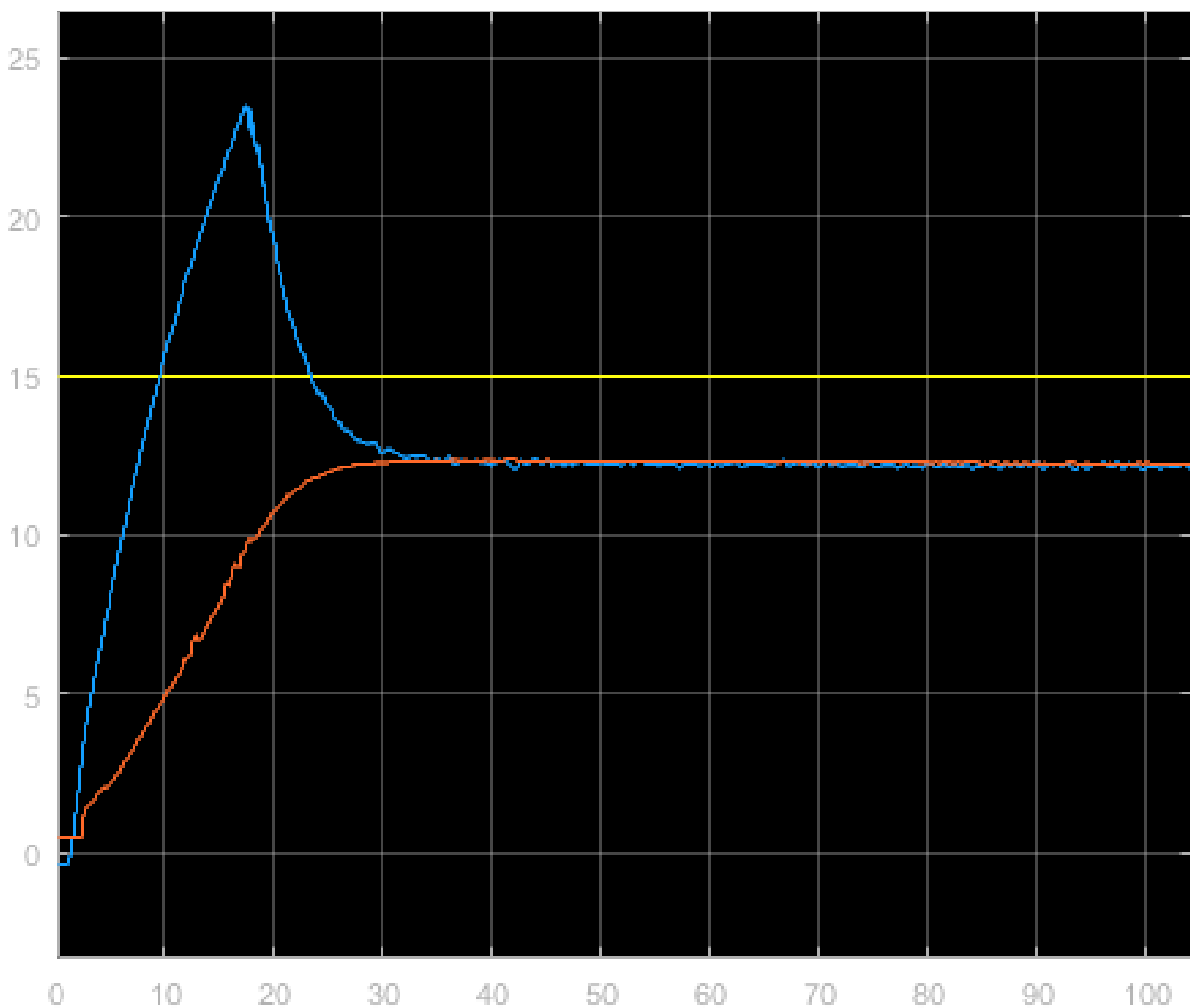
Figura 21: Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Integrativo - Proporcional Derivativo)



#### 4.3.5 Controlador primário - Proporcional Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Integrativo

Ao inverter a configuração anterior dos controladores. O conjunto PD-PI apresentou-se ser uma escolha adequada de controladores para ser utilizado no modelo em cascata, em que obteve uma diminuição significativa no tempo necessário para a estabilização do sistema com relação a configuração anterior. No entanto, o ruído presente no sinal de controle ainda persistiu e o nível do tanque 2 permaneceu distante do valor de referência. A Figura 22 ilustra claramente a disparidade entre o nível do tanque 2 e o valor de referência, podendo ser ajustada alterando os valores dos ganhos.

Figura 22: Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Derivativo - Proporcional Integrativo)



#### 4.3.6 Controlador primário - Proporcional Integral Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Integral Derivativo

A partir dessa nova configuração, todas as ações de controle estão presentes em pelo menos um dos controladores.

Utilizando a configuração com dois controladores PID, tanto no controlador primário quanto no controlador secundário. Foram realizados dois testes nessa configuração, com os seguintes valores de constantes:

Teste 1

- Controlador primário:  $K_i = 0.05$ ,  $K_d = 0.05$
- Controlador secundário:  $K_i = 0.03$ ,  $K_d = 0.02$

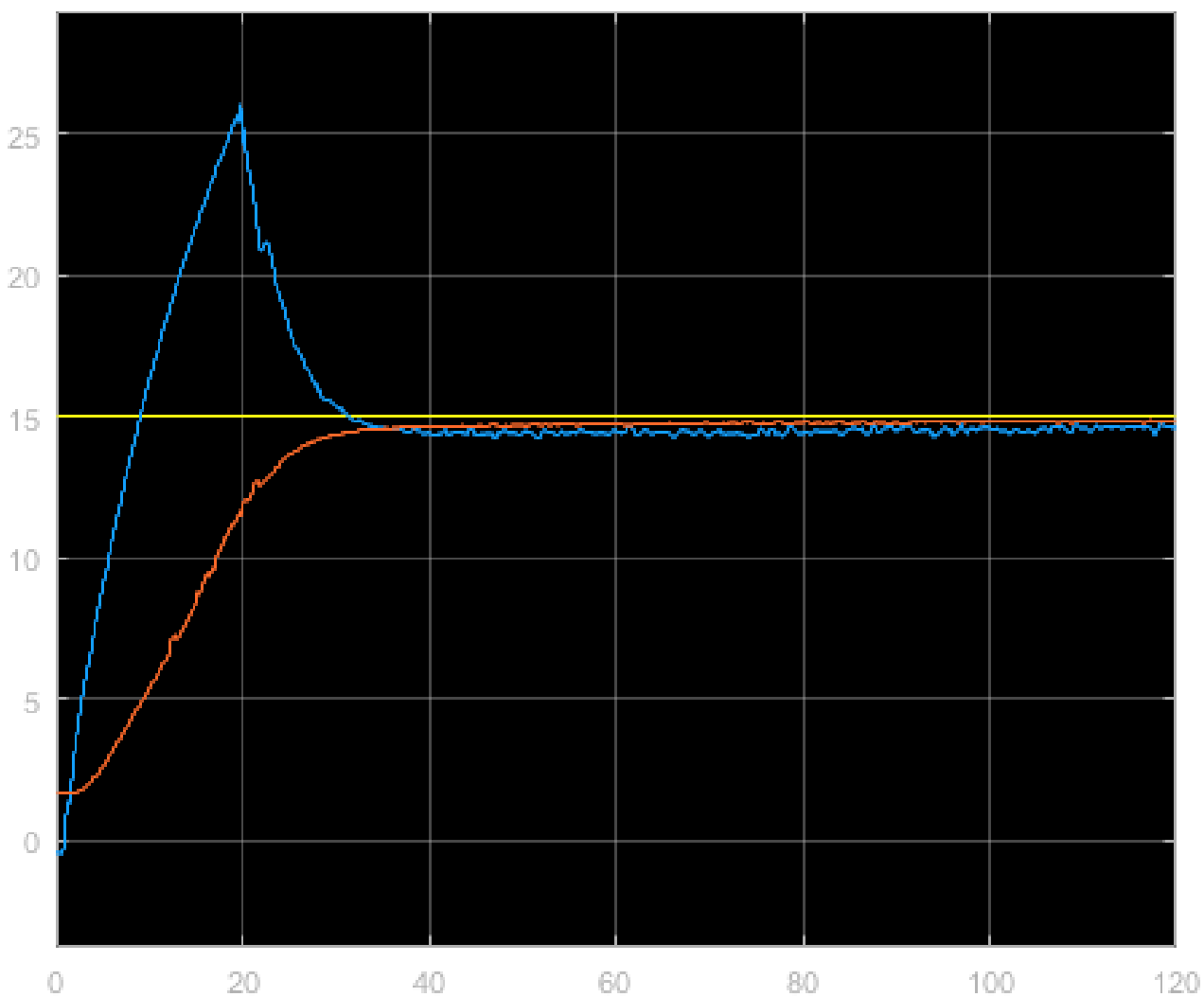
Teste 2

- Controlador primário:  $K_i = 0.06$ ,  $K_d = 0.05$
- Controlador secundário:  $K_i = 0.03$ ,  $K_d = 0.02$

Observou-se que a configuração com dois controladores PID foi a melhor configuração obtida. A principal diferença entre os dois testes foi a diminuição do erro após a acomodação do sistema. Notavelmente, essa redução do erro foi atribuída ao fato de que, no segundo teste, o valor de  $K_i$  no controlador primário foi aumentado em relação ao primeiro teste.

Os resultados desses novos testes podem ser visualizados na Figura 23, onde fica evidente a melhoria alcançada com essa configuração. A diminuição do erro após a acomodação do sistema reforça a eficácia do controlador PID nessa configuração e destaca a importância da sintonia adequada das constantes para obter um desempenho satisfatório no controle do sistema.

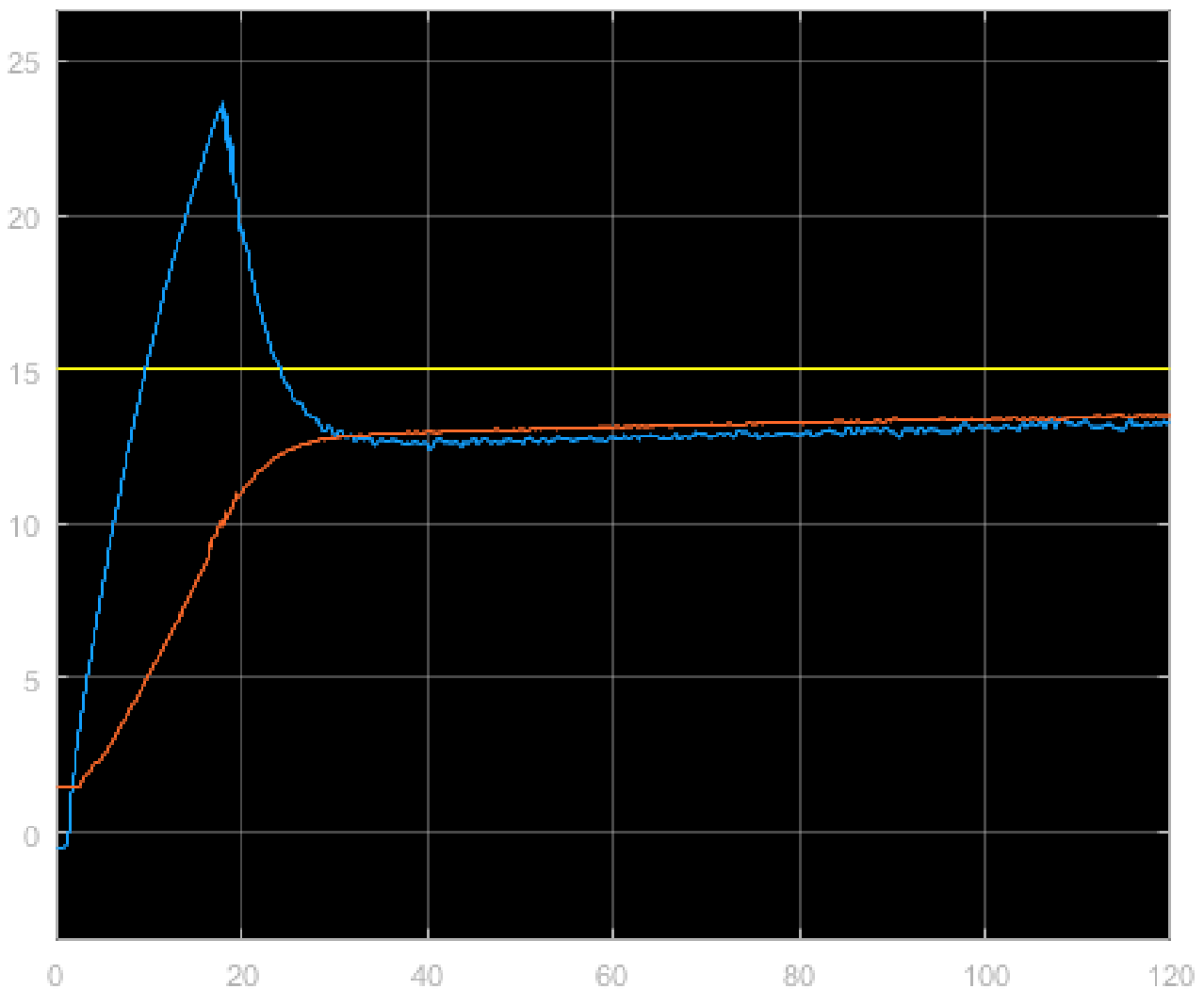
Figura 23: Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Integral Derivativo - Proporcional Integral Derivativo)



#### 4.3.7 Controlador primário - Proporcional Integral Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Derivativo

O próximo teste envolveu a utilização de PD no controlador secundário. Conforme a (figura 24), Pode-se notar um resultado parecido com que se foi obtido outras vezes, houve uma diminuição no erro em regime permanente em relação as primeiras monstagens dessa simulação, mas o tempo de acomodação do sistema ainda foi longo, indicando que a resposta do sistema demorou mais para se estabilizar.

Figura 24: Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Integral Derivativo - Proporcional Derivativo)

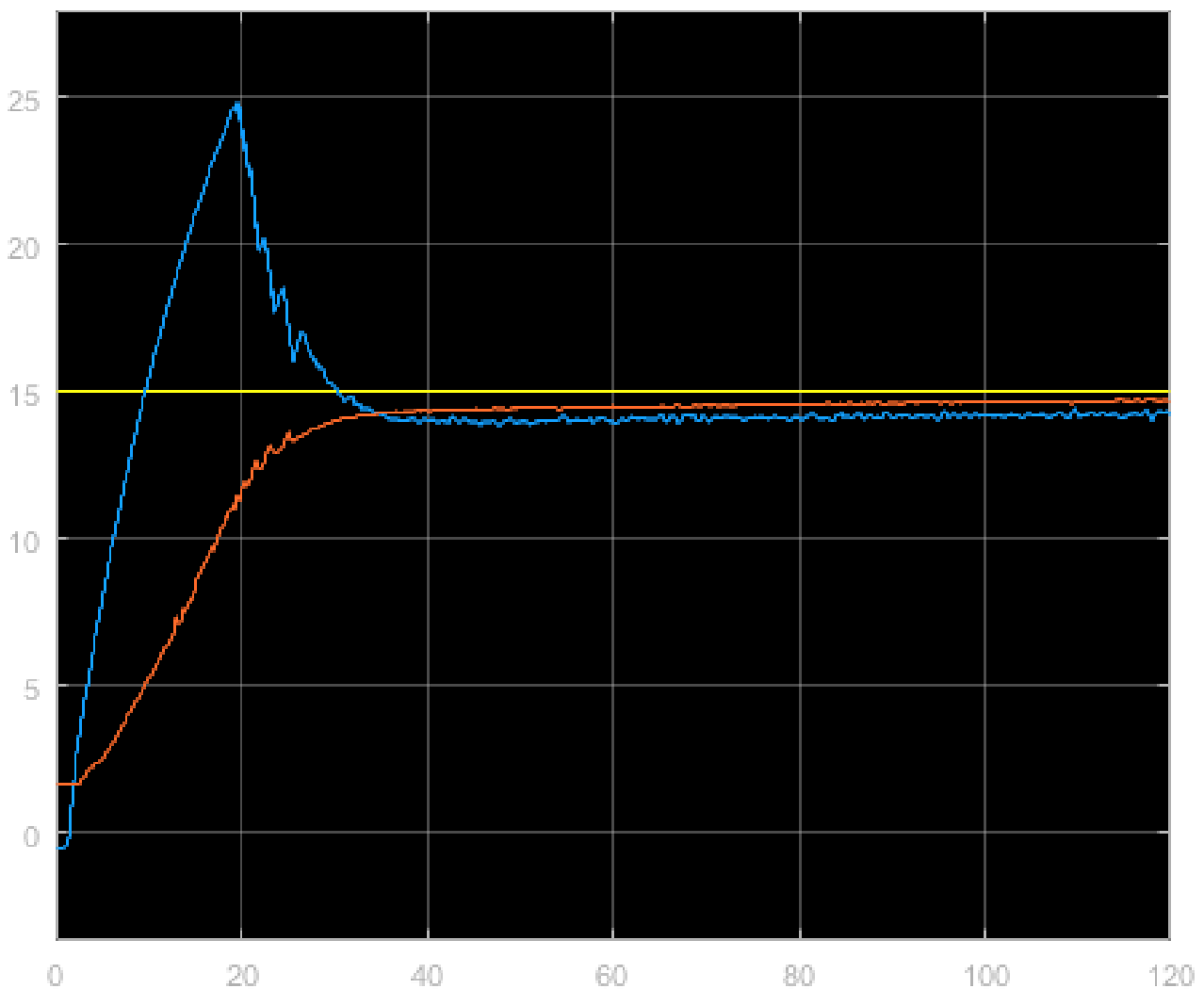


#### 4.3.8 Controlador primário - Proporcional Integral Derivativo / Controlador secundário - Proporcional Integrativo

O arranjo PID-PI se destacou como uma das configurações mais eficazes de controladores, uma vez que permite a rápida estabilização do nível de água do tanque 2, além de apresentar um erro de regime permanente reduzido.

Essa montagem resultou em uma significativa diminuição do erro após a acomodação do sistema, o que indica uma melhora em relação à configuração utilizada no teste anterior com PD. Além disso, o tempo de acomodação também foi reduzido. Esses resultados indicam que a configuração com um controlador primário PID e um controlador secundário PI é mais adequada para atingir os objetivos desejados de controle do sistema que a configuração usando um controlador proporcional derivativo no secundário.

Figura 25: Níveis dos tanques - Contralador em cascata (Proporcional Integral Derivativo - Proporcional Integrativo)



## 5 CONCLUSÃO

Através da utilização das ferramentas disponibilizadas e dos conceitos discutidos em sala de aula, obteve-se uma análise detalhada das ações de controle em cada configuração de montagem. Além disso, explorou-se o impacto da implementação de filtros, o que permitiu conduzir uma avaliação minuciosa dos resultados obtidos no experimento.

No experimento 2A, ficou evidente a necessidade de usar combinações de controladores e filtros para obter resultados satisfatórios em termos de desempenho do sistema. Essa necessidade surge em virtude de cada termo do controlador possuir um impacto distinto no sistema dinâmico, exigindo uma abordagem cuidadosa para otimizar o desempenho. Além disso, constatou-se que o controlador PD possui uma presença mais significativa de ruído em comparação com os outros controladores avaliados, resultando em uma eficiência inferior devido à sua maior suscetibilidade a ruídos.

No experimento 2B, que envolve sistemas de segunda ordem, diferentemente do experimento 2A, também foi identificada a necessidade de usar combinações de controladores e filtros para obter o melhor resultado possível. O desempenho do controlador PID apresentou resultados mais satisfatórios por possuir um menor erro de regime comparado com os outros, ou seja, o sistema nessa montagem alcançou mais rapidamente a referência desejada e manteve-se estável nesse valor.

Por fim, no experimento 2C foi utilizada uma configuração bem distinta das anteriores, no experimento em cascata, são utilizados dois controles interconectados, onde a saída de um controlador é utilizada como entrada para o próximo controlador. Essa abordagem em cascata tem como objetivo melhorar o desempenho do sistema de controle, fornecendo maior precisão e estabilidade em relação a um único controlador. Através dessa estrutura hierárquica, é possível alcançar um controle mais refinado, com a capacidade de lidar com diferentes características dinâmicas em cada estágio do processo. Outra diferença significativa é a necessidade de ajuste e sintonia dos controladores em cascata de forma conjunta, diferentemente dos experimentos individuais, onde cada controlador é ajustado independentemente, no experimento em cascata é preciso considerar as interações entre os controladores e otimizar os parâmetros de cada um para obter um desempenho global ideal. Dessa forma a combinação PID-PID se revelou como a escolha ideal para o controle em cascata. Em comparação com outras combinações, apresentou o tempo de estabilização mais curto e a maior precisão em relação ao erro de regime permanente. Outra opção a ser considerada é PID-PI, PI-PI e PD-PI que também atende aos requisitos desejados. A diferença entre esses conjuntos é que o controlador PD-PI possui um pouco mais de ruído no regime permanente e precisaria de alguns ajustes de ganho para chegar ao ponto de referência.

Conclui-se portanto, ser necessário considerar cuidadosamente os efeitos de cada termo do controlador, bem como a influência dos filtros, a fim de selecionar a combinação mais adequada para obter um desempenho satisfatório do sistema de controle. Cada componente do controlador (proporcional, integral e derivativo) desempenha um papel fundamental na resposta do sistema, sendo importante realizar experimentos e análises comparativas para identificar qual conjunto de controladores e filtros proporciona o melhor resultado de acordo com os objetivos e requisitos específicos do sistema.



## 6 REFERÊNCIAS

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderna**. 5. ed. Prentice Hall, 2010.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de Controle Modernos**. 13. ed. LTC Editora, 2016.

BECKER, A. J.; SILVA, D. M. I. da; DIAS, F. H. S.; PINHEIRO, L. K. Noções Básicas de Programação em MATLAB. **UFSM - Universidade Federal de Santa Maria**, 2010.

Disponível em: [https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/783/2020/02/Apostila\\_Matlab.pdf/](https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/783/2020/02/Apostila_Matlab.pdf/). Acesso em: 09 de jun. de 2023.

Ações de controle. **Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP**, 2003. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/em621/aulas/aula17/acoesdecont.pdf>. Acesso em: 09 de jun. de 2023.

ELLER, Daniel. Em Aprenda com a VelkiControle em cascata - Entenda o que é e como funciona esse sistema de regulação. **Velki Instrumentos de Medição e Controle**, 2013. Disponível em: <https://velki.com.br/pt/blog/aprenda-com-a-velki/controle-em-cascata—entenda-o-que-e-e-como-funciona-esse-sistema-de-regulagem>. Acesso em: 09 de jun. de 2023.

MORISHITA, Helio Mitio. Respostas de sistemas de primeira e segunda ordem. **Moodle USP: e-Disciplinas**, 2016. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4429153/mod\\_resource/content/1/Cap\\_5\\_Respostas%20de%20sistemas%20de%20primeira%20e%20de%20segunda%20ordem.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4429153/mod_resource/content/1/Cap_5_Respostas%20de%20sistemas%20de%20primeira%20e%20de%20segunda%20ordem.pdf). Acesso em: 08 de jun. de 2023.

GUIMARÃES, Fábio. Controle P, I, D, PI, PD e PID. **Mundo Projetado**, 2021. Disponível em: <https://mundoprojetado.com.br/controle-pid/>. Acesso em: 08 de jun. de 2023.