



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

RELATÓRIO DA EXPERIÊNCIA 2
Controle PID de Sistemas Dinâmicos:
Sistemas de Primeira e Segunda Ordem e Controle em Cascata

TURMA: 01
GRUPO 2

JOÃO MATHEUS BERNARDO RESENDE: 20210072270

LUCAS BATISTA DA FONSECA: 20210072299

STHEFANIA FERNANDES SILVA: 20210072430

Natal-RN
2022

JOÃO MATHEUS BERNARDO RESENDE: 20210072270

LUCAS BATISTA DA FONSECA: 20210072299

STHEFANIA FERNANDES SILVA: 20210072430

**Controle PID de Sistemas Dinâmicos:
Sistemas de Primeira e Segunda Ordem e Controle em Cascatar**

Primeiro Relatório Parcial apresentado à disciplina de Laboratório de Sistemas de Controle, correspondente à avaliação da 2ª unidade do semestre 2022.1 do 7º período do curso de Engenharia Mecatrônica na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sob orientação do **Prof. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo.**

Professor: Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo.

Natal-RN
2022

RESUMO

Em posse de conhecimentos sobre modelagem de sistemas dinâmicos e controladores PID foram feitas três simulações utilizando a bancada de tanque acoplados Quanser e o Simulink do MATLAB. Na primeira e segunda simulação foram realizadas o controle de um sistema de primeira ordem e segunda ordem, respectivamente, utilizando controladores PID e filtros de ação derivativa e *Anti-WindUp* (*Anti-Reset Windup*). Já na simulação 3, foi feito o controle de um sistema em cascata utilizando o conceito de controlador mestre e escravo. Os resultados encontrados foram condizentes com o esperado, exceto do sistema em cascata que apresentou alguns problemas.

Palavras-chave: Modelagem de Sistemas, Sistemas de Controle, Tanque Acoplados, Controlador PID, Sistemas em Cascata, Intertravamento.

Lista de Figuras

1	Dois sistemas de primeira ordem conectados, formando um de segunda ordem.	9
2	Estrutura de um sistema de controle	9
3	Sistema com controlador P no domínio do tempo.	10
4	Sistema com controlador P no domínio da frequência.	11
5	Sistema com controlador I no domínio do tempo.	11
6	Sistema com controlador PI no domínio da frequência.	12
7	Bancada Quanser	15
8	Modelo do laboratório A	16
9	Filtro <i>Anti-WindUp</i> (<i>Anti-Reset Windup</i>)	16
10	Filtro da Ação Derivativa	17
11	Intertravamento do laboratório B	17
12	Implementação no MATLAB dos controladores em cascata	18
13	a) Nível para $k_p = 3$ b) Nível para $k_p = 6$ a) Nível para $k_p = 10$	21
14	a) Nível para $k_i = 0.03$ b) Nível para $k_i = 0.3$	22
15	a) Erro para $k_p = 3$ b) Erro para $k_p = 3$ $k_i = 0.3$	23
16	Cascata de controlador P com P	24
17	Cascata de controlador P com PI	24
18	Cascata de controlador P com PID	25
19	Cascata de controlador PI com P	26
20	Cascata de controlador PI com PI	26
21	Cascata de controlador PI com PID	27
22	Cascata de controlador PID com PID	27

Sumário

1	INTRODUÇÃO	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1	Modelagem de Sistemas	8
2.2	Sistemas de Primeira Ordem	8
2.3	Sistemas de Segunda Ordem	8
2.4	Sistemas de controle	9
2.5	Ações de controle	10
2.6	Sistemas em Cascata	12
2.7	Intertravamentos	13
3	METODOLOGIA	14
3.1	Ferramentas de Simulação	14
3.1.1	MATLAB/Simulink	14
3.1.2	Tanques Quanser	14
3.2	Leitura e Coleta de Dados	15
3.2.1	Análise do problema	15
3.2.2	Laboratório A	15
3.2.3	Laboratório B	17
3.2.4	Laboratório C	18
4	RESULTADOS	19
4.1	Controlador PID para um Sistema de Primeira Ordem	19
4.1.1	Primeira Ordem: Controle Proporcional (P)	19
4.1.2	Primeira Ordem: Controlador Proporcional + Integral (PI)	19
4.1.3	Primeira Ordem: Controlador PI Filtro Anti-WindUp (Anti-Reset Windup)	19
4.1.4	Primeira Ordem: Controlador Proporcional + Derivativo (PD)	19
4.1.5	Primeira Ordem: Controlador PD com Filtro da Ação Derivativa	19
4.1.6	Primeira Ordem: Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)	20
4.2	Controlador PID para um Sistema de Segunda Ordem	20
4.2.1	Segunda Ordem: Controle Proporcional (P)	20
4.2.2	Segunda Ordem: Controlador Proporcional + Integral (PI)	22
4.2.3	Segunda Ordem: Controlador PI Filtro Anti-WindUp (Anti-Reset Windup)	23
4.2.4	Segunda Ordem: Controlador Proporcional + Derivativo (PD) com Filtro da Ação Derivativa	23
4.2.5	Segunda Ordem: Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)	23
4.3	Sistema em Cascata	23
4.3.1	Controlador Mestre P e Controlador Escravo Variando	23
4.3.2	Controlador Mestre PI e Controlador Escravo Variando	25
4.3.3	Controlador Mestre PID e Controlador Escravo Variando	27

1 INTRODUÇÃO

O objetivo de um projeto de engenharia de controle é encontrar as configurações, especificações e identificar os parâmetros chave do sistema proposto para atender uma necessidade pontual. Um importante aliado do engenheiro projetista são os modelos computacionais que permitem visualizar o comportamento do sistema, sem necessariamente construí-lo (DORF; BISHOP, 2001).

Assim, a simulação computacional fará o uso de um modelo com as condições e as entradas reais em que o sistema será submetido. Com um modelo e simulação fundamentalmente exatos pode-se observar o desempenho do sistema sob todas as condições possíveis, extrapolar resultados para prever algum comportamento, dentre outras vantagens (DORF; BISHOP, 2001).

Nesse contexto, através de um modelo computacional do sistema de tanques acoplados Quanser, será feito: no experimento A o controle de um sistema de primeira ordem (tanque 1) com o controladores PID; no experimento B o controle de um sistema de segunda ordem (tanque 2 através do tanque 1) com o controladores PID e no experimento C, o controle de um sistema em cascata do tanque 2 através do tanque 1.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse tópico apresentamos o embasamento teórico no qual este trabalho se fundamenta.

2.1 Modelagem de Sistemas

Um modelo pode ser compreendido, de modo geral, como sendo qualquer representação ou aproximação simplificada da realidade. Dessa forma, o modelo possibilita a previsão de comportamentos e a reconstrução matemática da realidade.

"O modelo é uma estrutura simplificada da realidade que supostamente apresenta, de tal forma generalizada, características ou relações importantes. Por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por obscurecem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais" (CHORLEY RICHARD; HAGGETT, 2013).

Os modelos experimentais fundamentam-se em experimentos que visam simular, ou seja, se aproximar o máximo possível das características e da composição do sistema, tendo como objetivo ter o controle sobre as grandezas que o compõe e compreender a dinâmica dos processos (CHRISTOFOLLETTI, 1999).

2.2 Sistemas de Primeira Ordem

É um sistema que pode representar um circuito RC (resistor-capacitor), um sistema térmico ou algo semelhante. Este é descrito pela seguinte equação diferencial:

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

O ganho do processo (K) é a razão entre a variação da variável de saída em relação à variável de entrada. Já a constante de tempo, τ , caracteriza o tempo de resposta de um sistema. Maiores constantes de tempo indicam um sistema mais lento, enquanto constantes de tempos baixas indicam processos mais ágeis, ou seja, que se aproximam do valor final mais rapidamente (RESPONDEAI, 2022).

2.3 Sistemas de Segunda Ordem

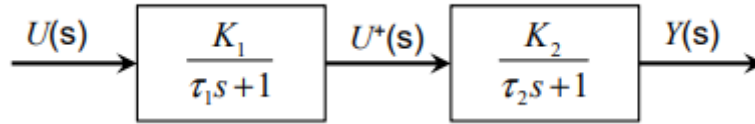
Um sistema de segunda ordem é aquele cuja saída $y(t)$ é descrita pela solução de uma equação diferencial de segunda ordem (BOJORGE, 2022).

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + ay = bu(t) \quad (2)$$

onde $u(t)$ é a entrada (ou função força).

A função de transferência de segunda ordem pode surgir fisicamente. Pode-se obter um sistema de segunda ordem através de dois processos de primeira ordem conectados em série (BOJORGE, 2022).

Figura 1: Dois sistemas de primeira ordem conectados, formando um de segunda ordem.



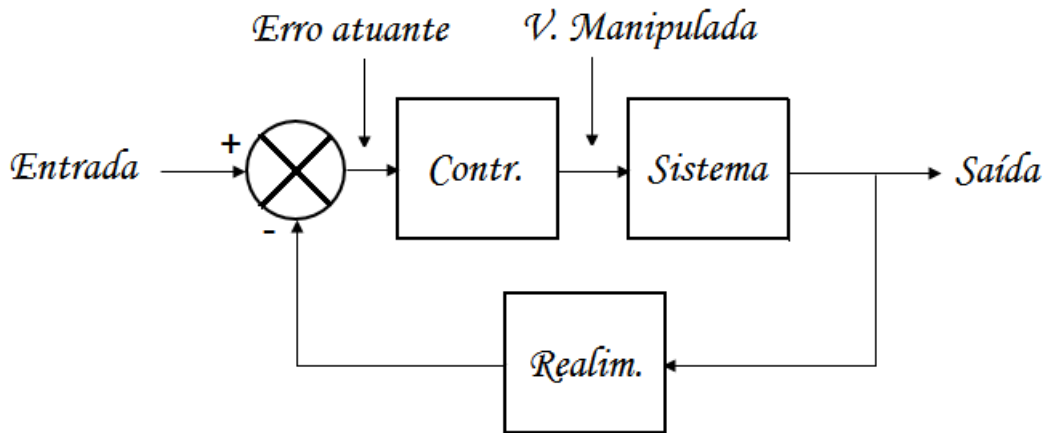
O modelo apresentado na Figura 1, resulta na seguinte equação diferencial:

$$G(s) = \frac{\bar{y}(s)}{\bar{u}(s)} = \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\xi \tau s + 1} \quad (3)$$

2.4 Sistemas de controle

Um sistema realimentado é composto por três partes: o sistema a ser controlado, controlador e realimentação (MADEIRA, 2016c).

Figura 2: Estrutura de um sistema de controle



Fonte: (MADEIRA, 2016c).

O sistema a ser controlado é constituído por um processo capaz de realizar as ações necessárias para encontrar resultado desejado. Essa, na maioria dos casos, é a parte fixa do sistema de controle, ou seja, a parte que normalmente não pode ser modificada em virtude de ser fruto de um projeto. Já os outros dois elementos têm como intuito fazer com que o sistema possua estabilidade e opere com certa precisão e agilidade, seguindo as especificações estabelecidas (MADEIRA, 2016c).

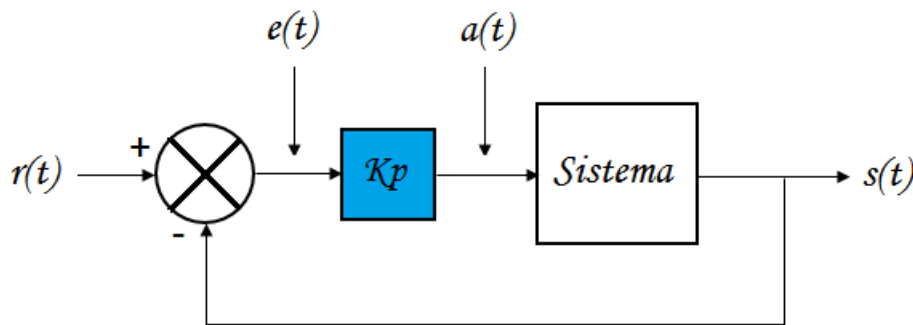
Pode-se observar na Figura 2 que o controlador encontra-se inserido à esquerda do sistema de controle, após o comparador. Dessa forma, pode-se dizer que a configuração utilizada é a de um controlador série. No que tange a realimentação, é importante ressaltar que um sistema de controle realimentado compara, instantaneamente, o valor de saída da planta, medido por um sensor, com o valor de referência (ou valor desejado) inserido na entrada do sistema (MADEIRA, 2016c).

O resultado desta comparação é o centro de toda teoria estudada e é denominado erro estacionário. O erro é levado ao controlador, que produz o sinal de controle que tem como função reduzir a diferença entre a saída e o sinal desejado (MADEIRA, 2016c).

2.5 Ações de controle

O controlador mais simples dentre as estruturas de controle é o Controlador Proporcional (P). Nele, a saída (conhecida como sinal de controle ou ação de controle) é diretamente proporcional ao erro estacionário (MADEIRA, 2016c).

Figura 3: Sistema com controlador P no domínio do tempo.



Fonte: (MADEIRA, 2016c).

Através do conceito do controlador proporcional e ao observar a Figura 3, podem ser feitas algumas conclusões matemáticas. Primeiramente, como há uma proporcionalidade direta entre o sinal de controle e o sinal de erro deve-se admitir uma constante de proporcionalidade entre eles. Esta constante é chamada de ganho proporcional K_p (MADEIRA, 2016c).

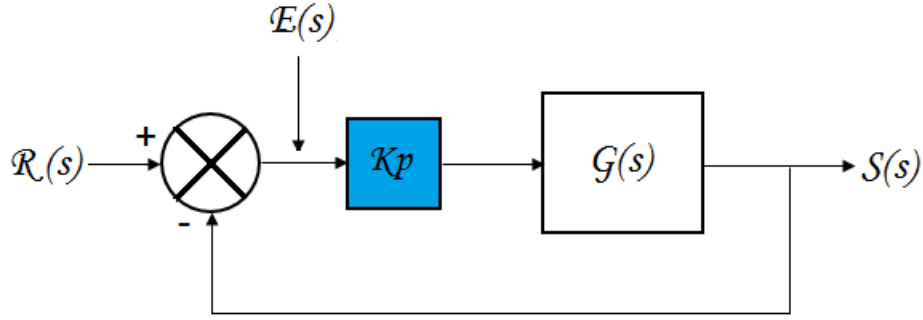
$$a(t) = K_p \cdot e(t) \quad (4)$$

Outra forma de escrever o erro, é expressando que ele é a diferença entre o sinal de entrada o sinal de saída. Logo, temos a equação 5.

$$a(t) = K_p \cdot (r(t) - s(t)) \quad (5)$$

Utilizando a transformada de Laplace o controlador P tem o formato mostrado na Figura 4, quando no domínio da frequência.

Figura 4: Sistema com controlador P no domínio da frequência.

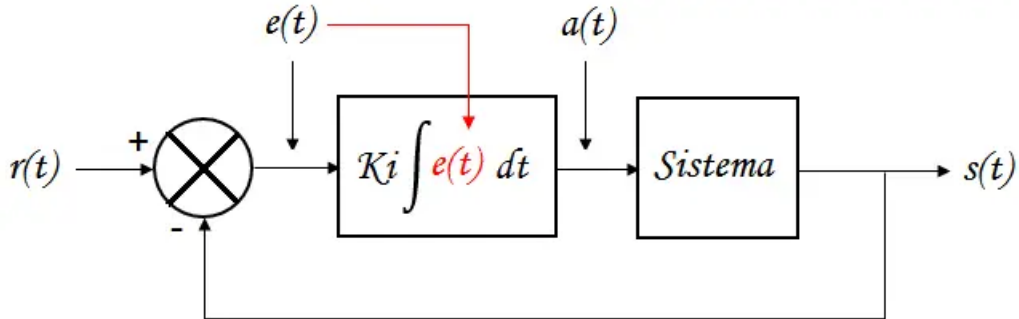


Fonte: (MADEIRA, 2016c).

A análise do sistema em malha fechada no domínio da frequência mostra que quanto maior for o K_p , menor será o ganho de regime permanente. Além disso, erro estacionário em regime permanente diminui. Em contrapartida, o aumento de K_p torna o sistema mais oscilatório, algo que instabilizá-lo. E na mesma medida que melhora o regime permanente e piora o transitório, sendo bastante limitado (MADEIRA, 2016c).

No Controlador Integral a saída de controle é diretamente proporcional à integral do sinal de erro estacionário. Dessa forma, temos uma constante de proporcionalidade chamada de ganho integrativo K_i (MADEIRA, 2016a).

Figura 5: Sistema com controlador I no domínio do tempo.



Fonte: (MADEIRA, 2016a)

Assim, a equação 6 rege esse controlador.

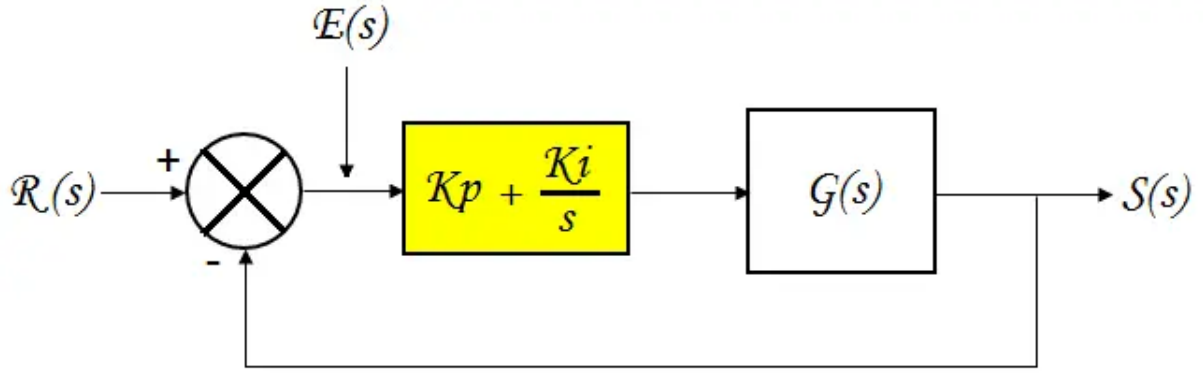
$$a(t) = K_i \cdot \int r(t) - s(t) dt \quad (6)$$

Assim, controlador proporcional+integral (PI) tem uma componente proporcional ao erro e outra proporcional à integral do erro em sua ação de controle (MADEIRA, 2016b).

A atuação de um controlador PI melhora a resposta transitória com a contribuição da ação proporcional, já a ação integral corrige o erro de estado estacionário (ARAÚJO, 2007). Por meio da equação 7, onde $k_i = \frac{K_p}{\tau_i}$ e τ_i é o tempo integrativo ou *reset time*.

$$U(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} \cdot E(s) \quad (7)$$

Figura 6: Sistema com controlador PI no domínio da frequência.



Fonte: (MADEIRA, 2016b)

Como resultado o controlador PI tende a zerar o erro de regime, uma vez que aumenta o tipo do sistema adicionando um polo em $p = 0$ e um zero em $z = -\frac{K_i}{K_p}$. Também é utilizado quando a resposta transitória é boa mas a resposta em regime permanente é insatisfatória. Já que aumenta a ordem do sistema, são acrescentadas possibilidades de instabilidade diferentes daquelas apresentadas pelo sistema original (ARAÚJO, 2007).

A ação proporcional e derivativa gera um Controlador Proporcional + Derivativo (PD). Como os outros controladores há vantagens e desvantagens: ele melhora o regime transitório, possibilitando o aumento da estabilidade relativa do sistema e reduzindo o tempo de acomodação, porém ele aumenta o tempo de subida e, por não atuar no regime permanente, não corrige o erro estacionário (ARAÚJO, 2007).

Outra desvantagem é que a ação derivativa amplifica os sinais de ruído, algo que pode causar um efeito de saturação nos atuadores do sistema (ARAÚJO, 2007). O PD corresponde ao acréscimo de um zero ao sistema (em $z = -\frac{K_p}{K_d}$), como pode ser observado na equação 8.

$$U(s) = (k_p + k_d s) \cdot E(s) \quad (8)$$

Por fim, o Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID) une as ações proporcional, integral e derivativa em um único controlador. Dessa forma atua tanto no regime transitório quanto no regime permanente (ARAÚJO, 2007).

$$U(s) = (k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s) \cdot E(s) \quad (9)$$

Então, o controlador PID é utilizado quando temos resposta transitória e em regime insatisfatórias. Além disso, adiciona um polo em $p = 0$ e 2 zeros, os quais dependem dos parâmetros do controlador (ARAÚJO, 2007).

2.6 Sistemas em Cascata

O controle em cascata é implementado quando a malha de controle simples não responde satisfatoriamente, principalmente, em processos de grande inércia e/ou quando o processo possui

uma contínua perturbação em torno da variável manipulada. O controle em cascata consiste de um controlador primário que regula a um controlador secundário, melhorando a velocidade de resposta e reduzindo os distúrbios causados pela malha secundária. (SEBORG, 2016)

2.7 Intertravamentos

O intertravamento tem o objetivo de impedir o funcionamento da máquina, sob condições específicas. Por exemplo, uma chave instalada em um circuito elétrico com a finalidade de cortar a alimentação e impedir que a ação de uma pessoa seja praticada (ADNORMAS, 2021).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão explicados os materiais e métodos utilizados na elaboração do relatório, desde as ferramentas de simulação à coleta dos dados.

3.1 Ferramentas de Simulação

3.1.1 MATLAB/Simulink

O MATLAB, do inglês *MATrix LABoratory*, é um ambiente de programação de alto nível interativo voltado para o cálculo numérico e elaboração de gráficos. Diferente das linguagens clássicas de programação, como C, no MATLAB não é necessário declarar variáveis, alocar memória ou utilizar ponteiros. Além de contar com um acervo de funções matemáticas implementadas, disponíveis para ser utilizadas pelo usuário (PET, 2014).

No ambiente do MATLAB há o Simulink, uma ferramenta que permite simulação e a modelagem de sistemas dinâmicos e embarcados. Com uma interface amigável, o Simulink permite criar modelos através de diagramas de blocos. Nele é possível simular qualquer máquina por meio da modelagem matemática (PET, 2014).

3.1.2 Tanques Quanser

A Quanser é uma empresa especializada em fabricar equipamentos laboratoriais, para estudo e pesquisa, das áreas de controle; robótica e mecatrônica (QUANSER, 2022). Dentre os produtos fabricados pela Quanser há o sistema de dois tanques acoplados, objeto de estudo deste relatório.

A bancada Quanser é formada por dois tanques acoplados, uma bomba, tubos e conexões hidráulicas e um reservatório de água na parte inferior do sistema, que possui recirculação de água. Em ambos os tanques, o líquido é retirado pelo fundo do cilindro através de um orifício de saída na parte de baixo. Um sensor, localizado na parte inferior de cada tanque, mede o nível da água em cada um deles. Na Figura 7 podemos observar a bancada de tanques acoplados utilizada nesse estudo.

Figura 7: Bancada Quanser



Fonte: Quanser.

3.2 Leitura e Coleta de Dados

3.2.1 Análise do problema

Em posse dos roteiros, foi preciso compreender os conceitos de modelagem e controle de sistemas dinâmicos e o funcionamento de tanques acoplados para executar as simulações. Para isso, foram utilizados: o sistema de tanques acoplados da Quanser; uma placa de aquisição de dados (Q8-USB da Quanser); um módulo de potência (VoltPAQ-X1) e o Simulink do MATLAB.

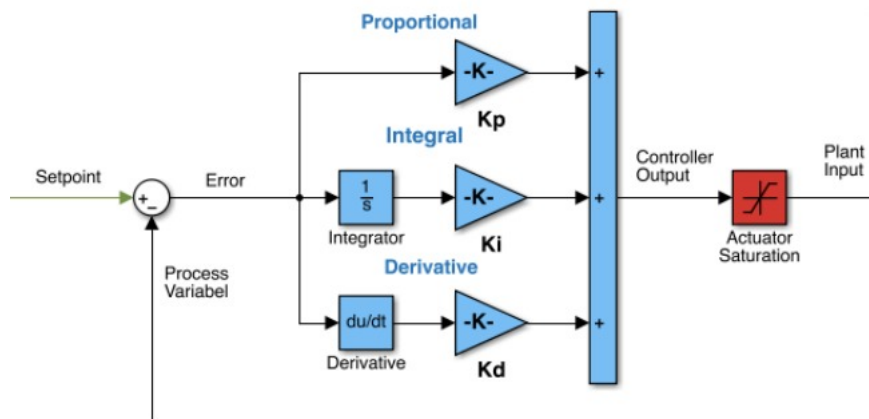
Foi utilizado um sistema de segurança e a implementação dos controladores PID foi feita utilizando blocos básicos da biblioteca do Simulink. Outro ponto importante, é que para realizar o controle em malha fechada, o sinal de controle calculado antes de ser escrito na porta selecionada, foi saturado em ± 4 volts, isso foi feito para respeitar os limites operacionais da bomba do sistema de tanques.

Para a interpretação dos gráficos gerados no Simulink foi preciso entender as ações de controle e o papel de cada tipo de ganho nos sistemas de primeira e segunda ordem e em cascata.

3.2.2 Laboratório A

A primeira simulação, modelada no Simulink, foi feita com objetivo de controlar o tanque 1.

Figura 8: Modelo do laboratório A



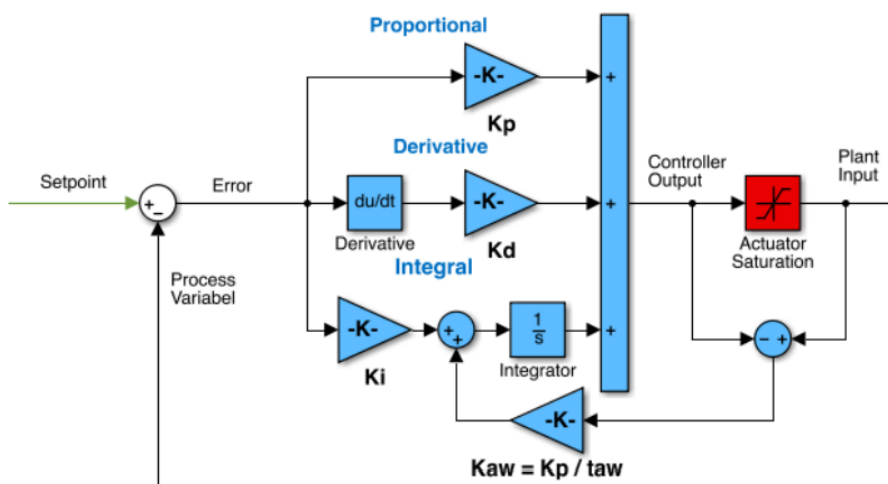
Fonte: Autores.

O controle do tanque foi feito a partir de um *setpoint* pré-definido de 10 cm. Para isso foi preciso alterar os valores de K_p , K_i e K_d e observar o comportamento da saída ao fazer essas alterações. O intuito dessa prática é controlar um sistema de primeira ordem.

Então são testados os seguintes controladores: Controlador Proporcional (alterando somente o valor de K_p), Controlador Proporcional-Integrativo (alterando o valor de K_p e K_i), Controlador Proporcional- Derivativo (alterando o valor de K_p e K_d) e Controlador Proporcional-Integrativo-Derivativo (alterando todos os valores dos ganhos). Para isso, foi utilizado o sistema mostrado na Figura 8.

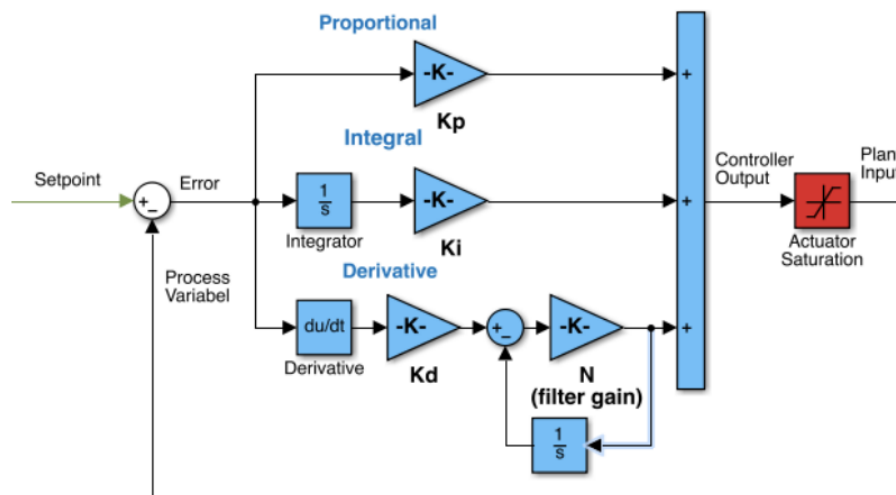
Além disso, os filtros (*Anti-WindUp* e de ação derivativa) foram testados, com a montagem mostrada na Figuras 9 e 10 , respectivamente.

Figura 9: Filtro *Anti-WindUp* (*Anti-Reset Windup*)



Fonte: Autores.

Figura 10: Filtro da Ação Derivativa



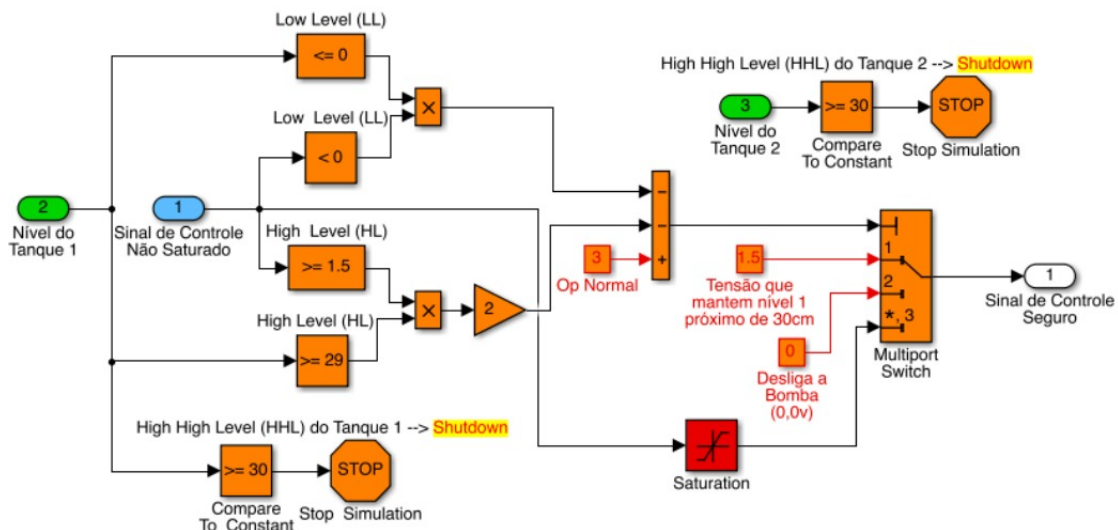
Fonte: Autores.

3.2.3 Laboratório B

A segunda simulação, igualmente modelada no Simulink, foi realizada com um sistema de segunda ordem com objetivo de controlar o tanque 2 através do tanque 1. Diferente da montagem do controlador PID do laboratório A, Figura 8, no laboratório B a realimentação é feita com o tanque 2.

Nessa simulação o tanque 1 é utilizado como entrada do intertravamento, mostrado na Figura 11. O intertravamento é um sistema de segurança criado para evitar que os tanques transbordem; ultrapassem o valor de +/-4V ou fiquem completamente secos, algo que pode causar danos aos equipamentos.

Figura 11: Intertravamento do laboratório B



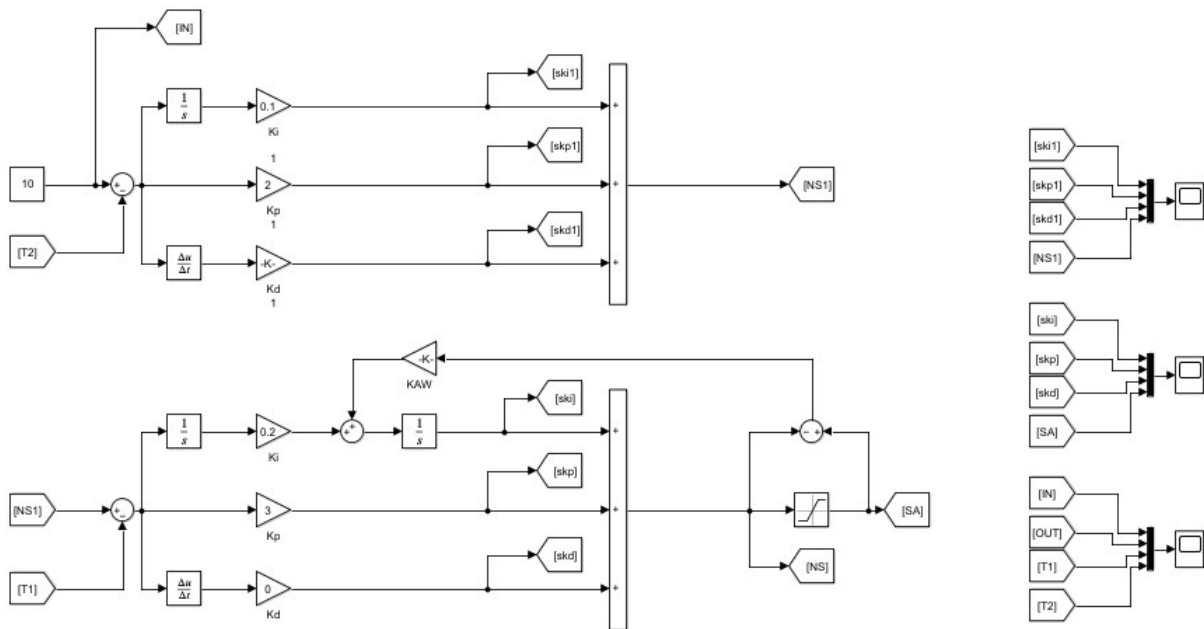
Fonte: Autores.

O intuito dessa prática é entender como se comportam os controladores PID em um sistema de segunda ordem.

3.2.4 Laboratório C

A implementação em cascata desenvolvida no MATLAB segue a configuração ilustrada na Figura 12, onde a saída nomeada de *NS1* é a saída do controlador mestre e *SA* é a saída do escravo com o saturador e com o *anti wind-up*.

Figura 12: Implementação no MATLAB dos controladores em cascata



Fonte: Autores.

O intuito dessa prática é entender como se comportam os controladores PID em um sistema em cascata.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e descritos os resultados obtidos dos experimentos.

4.1 Controlador PID para um Sistema de Primeira Ordem

Utilizando um controlador PID em um sistema de primeira ordem buscou-se controlar o nível do tanque 1 em 15 cm.

4.1.1 Primeira Ordem: Controle Proporcional (P)

Para analisar a ação do controlador proporcional, os valores dos ganhos K_i e K_d foram zerados e diversos valores de k_p foram testados. Utilizando o controlador proporcional no experimento A observou-se que o sistema alcançava o o nível que era desejado em seu *setpoint*, porém exigia bastante tempo.

4.1.2 Primeira Ordem: Controlador Proporcional + Integral (PI)

Utilizando o controlador proporcional-integrativo pode-se observar que o experimento alcançou o valor desejado mais rápido do que quando possuía apenas o k_p , ou seja, atingiu um valor de regime permanente mais rápido. Nesse mesmo caso ocorreu também de aparecer um *overshoot*, entretanto o *overshoot* é controlável mudando os ganhos.

4.1.3 Primeira Ordem: Controlador PI Filtro Anti-WindUp (Anti-Reset Windup)

Um filtro Anti-WindUp sobre o controlador I atua minimizando a velocidade de integração. Dessa forma, é feita a diferença entre o sinal de controle saturado e o não saturado, o resultado é aplicado na ação integrativa. O papel do filtro é impedir que o sinal sature, assim se o sinal saturar o filtro vai desacelerar o acúmulo da ação integrativa. Um ponto importante é que o ganho do filtro (k_{aw}) deve ser menor ou igual a k_i .

4.1.4 Primeira Ordem: Controlador Proporcional + Derivativo (PD)

Na simulação realizada com o controlador proporcional derivativo, observou-se que existia uma grande quantidade de ruído. Sendo assim, concluiu-se que esse controlador não era adequado para essa aplicação.

4.1.5 Primeira Ordem: Controlador PD com Filtro da Ação Derivativa

O filtro da ação derivativa diminuiu o ruído através da redução dos intervalos das derivadas. Isso melhorou o sinal de saída mas ainda prejudicou ele.

4.1.6 Primeira Ordem: Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

O controlador PID se mostrou tão eficiente quanto o PI, a diferença é que no PID havia um pouco mais de ruído. Algo que era possível diminuir, alterando o valor de K_d .

Observou-se também que a curva, após o *overshoot* era um pouco mais suave. Um diferencial é que seu uso possibilita o controle no regime permanente e no transitório.

4.2 Controlador PID para um Sistema de Segunda Ordem

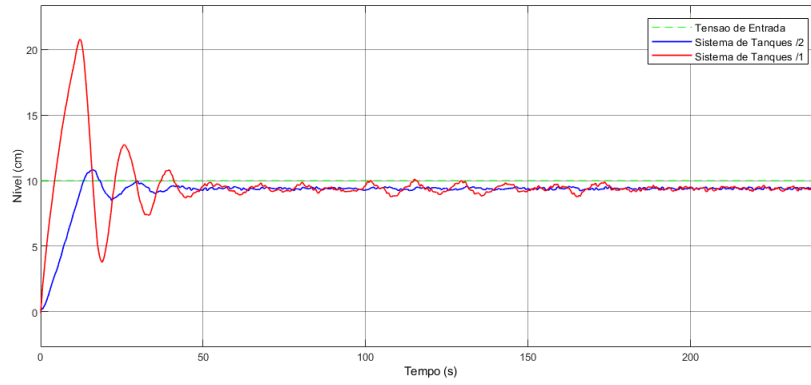
Utilizando um controlador PID em um sistema de segunda ordem buscou-se controlar o nível do tanque 2 em 10 cm. É importante destacar que o sistema de segunda ordem é mais sensível ao ruído, por essa razão somente foi feita a análise da ação derivativa utilizando um filtro.

4.2.1 Segunda Ordem: Controle Proporcional (P)

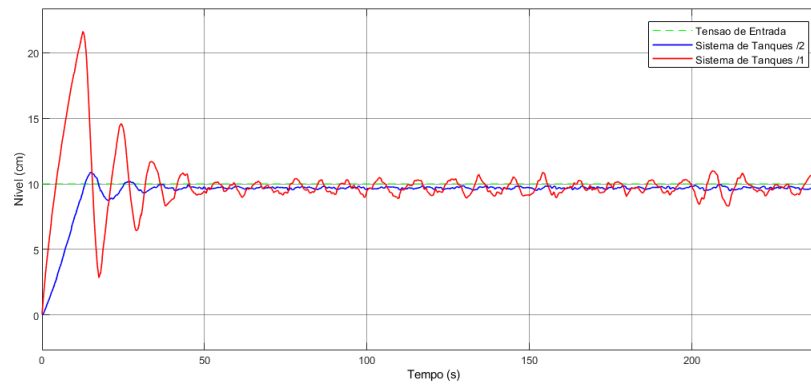
Para analisar a ação do controlador proporcional, os valores dos ganhos K_i e K_d foram zerados e diversos valores de k_p foram testados.

No que diz respeito ao nível do tanque 2, observou-se que quanto maior o k_p , mais próximo o nível do tanque 2 se encontra do nível de entrada. Isso acontece porque o aumento do ganho proporcional diminui o ganho em regime permanente e, por consequência, diminui a diferença entre a saída e a referência (saída desejada). Um ponto importante é que na mesma medida que o k_p aumentou, o tanque 1 tornou-se mais oscilatório. Os gráficos que comprovam tal análise podem ser visualizados na Figura 13.

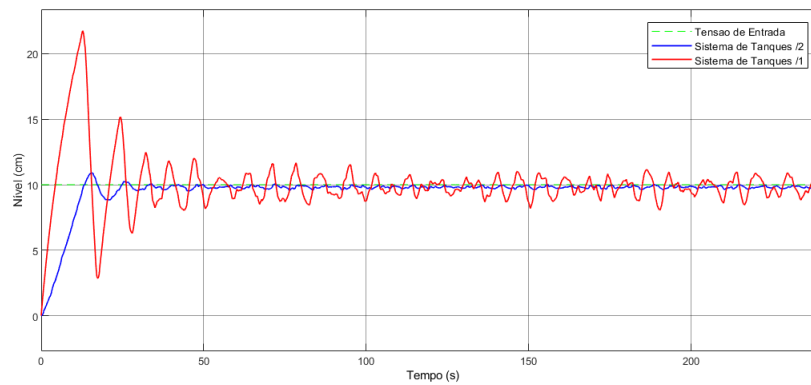
Figura 13: a) Nível para $k_p = 3$ b) Nível para $k_p = 6$ a) Nível para $k_p = 10$



a)



b)



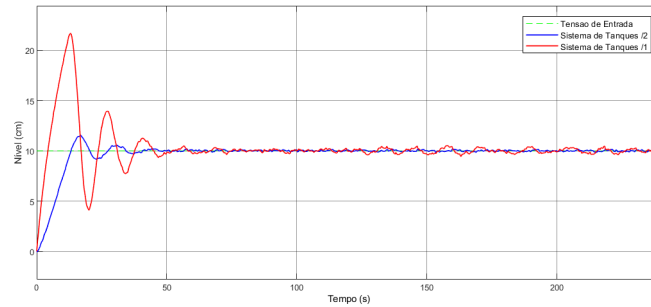
c)

Fonte: Autores.

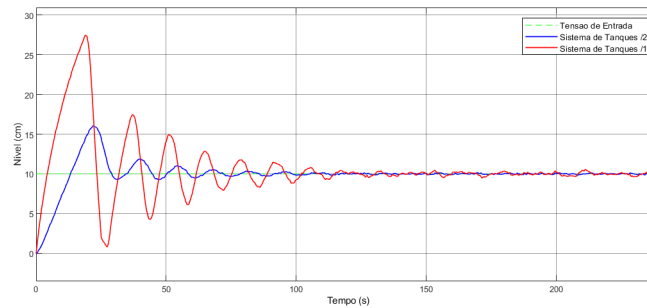
4.2.2 Segunda Ordem: Controlador Proporcional + Integral (PI)

Para a simulação do sistema com o controlador PI, fixou-se o valor de $k_p = 3$ e os valores de k_i foram variados. A análise mostrou que quanto maior o k_i , maior o *overshoot* causado no nível do tanque 1, algo que pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14: a) Nível para $k_i = 0.03$ b) Nível para $k_i = 0.3$



a)



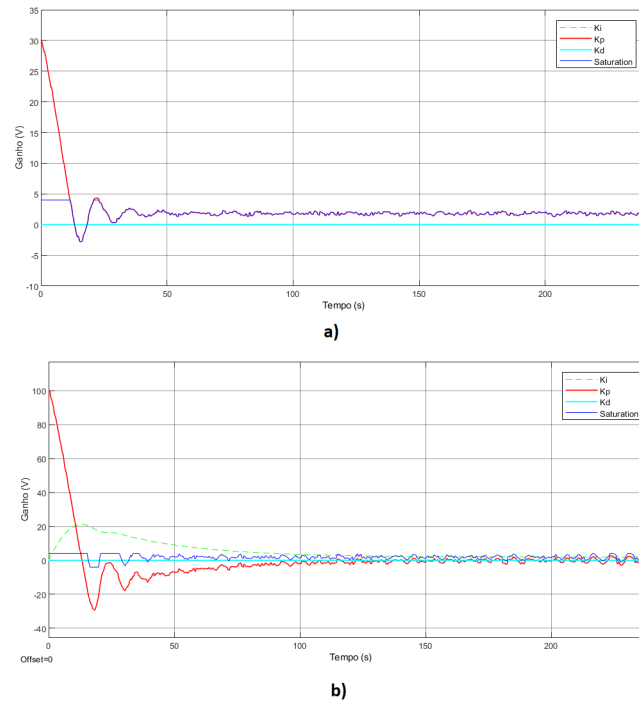
b)

Fonte: Autores.

Outro ponto importante é que a presença do ganho k_i aumentou a rapidez da resposta e permitiu que com um $k_p = 3$ o erro estacionário seja zerado. Algo que não é possível somente com o ganho proporcional, como pode se observar na Figura 15.

Uma solução para diminuir o *overshoot* seria aumentar o ganho k_p , em contrapartida isso deixaria o sistema mais lento.

Figura 15: a) Erro para $k_p = 3$ b) Erro para $k_p = 3$ $k_i = 0.3$



Fonte: Autores.

4.2.3 Segunda Ordem: Controlador PI Filtro Anti-WindUp (Anti-Reset Windup)

Um filtro *Anti-WindUp* sobre o controlador I atua minimizando a velocidade de integração. Dessa forma, é feita a diferença entre o sinal de controle saturado e o não saturado, o resultado é aplicado na ação integrativa. O papel do filtro é impedir que o sinal sature, assim se o sinal saturar o filtro vai desacelerar o acúmulo da ação integrativa.

Um ponto importante é que o ganho do filtro (k_{aw}) deve ser menor ou igual a k_i .

4.2.4 Segunda Ordem: Controlador Proporcional + Derivativo (PD) com Filtro da Ação Derivativa

O filtro da ação derivativa minimizou o ruído através da redução dos intervalos das derivadas.

4.2.5 Segunda Ordem: Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

A vantagem do uso do controlador PID é que ele possibilita seu uso tanto no regime permanente quanto no transitório. Assim, este foi o controlador que melhor se adequou ao sistema simulado

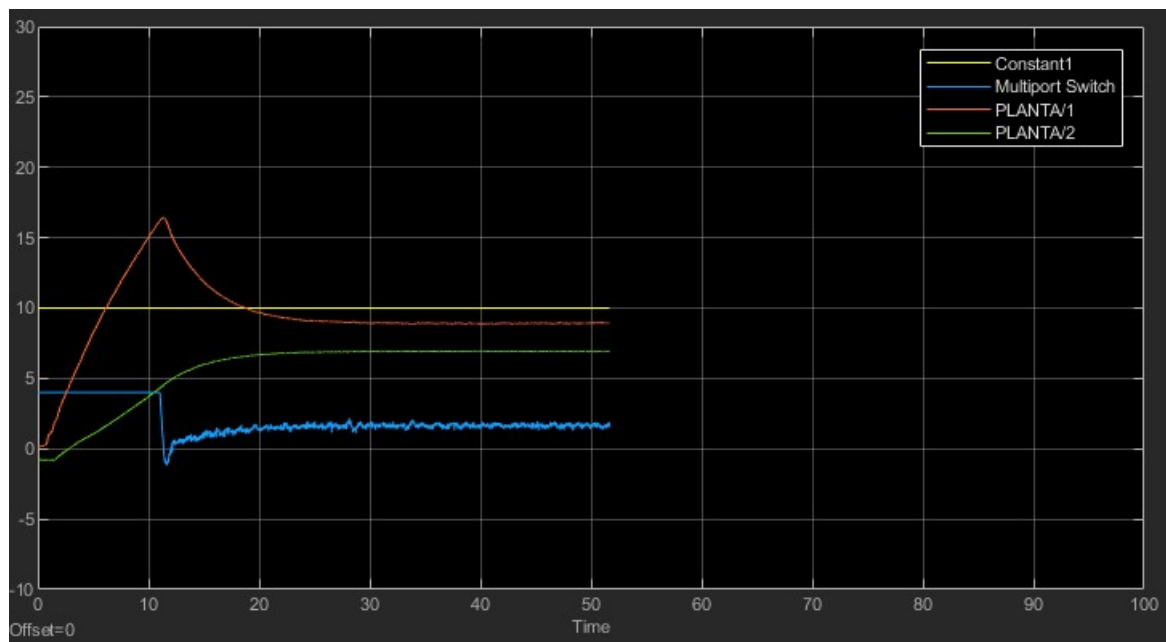
4.3 Sistema em Cascata

4.3.1 Controlador Mestre P e Controlador Escravo Variando

Usando a arquitetura do controlador mestre proporcional e variando o escravo entre P, PI e PID, pode-se observar que mesmo alterando o controlador escravo, o erro em regime permanente continua latente e pequenas diferenças entre as saídas com a variação dos controladores escravos são

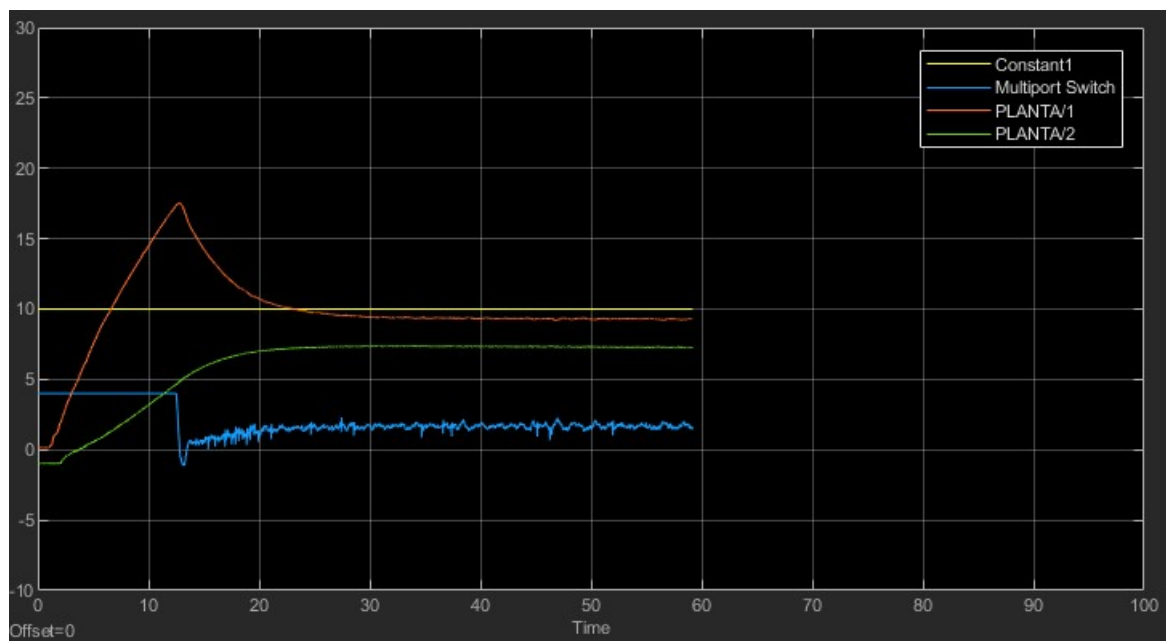
observadas. A Figura 18 ilustra como a adição da parte derivativa nessa aplicação adiciona ruído no sistema.

Figura 16: Cascata de controlador P com P



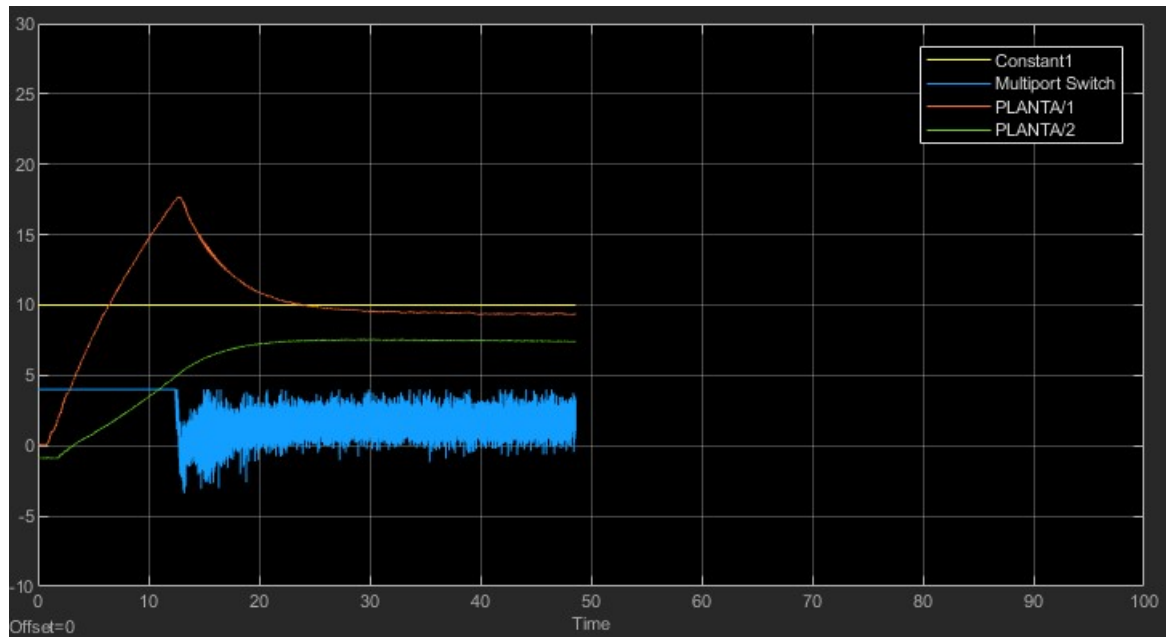
Fonte: Autores.

Figura 17: Cascata de controlador P com PI



Fonte: Autores.

Figura 18: Cascata de controlador P com PID



Fonte: Autores.

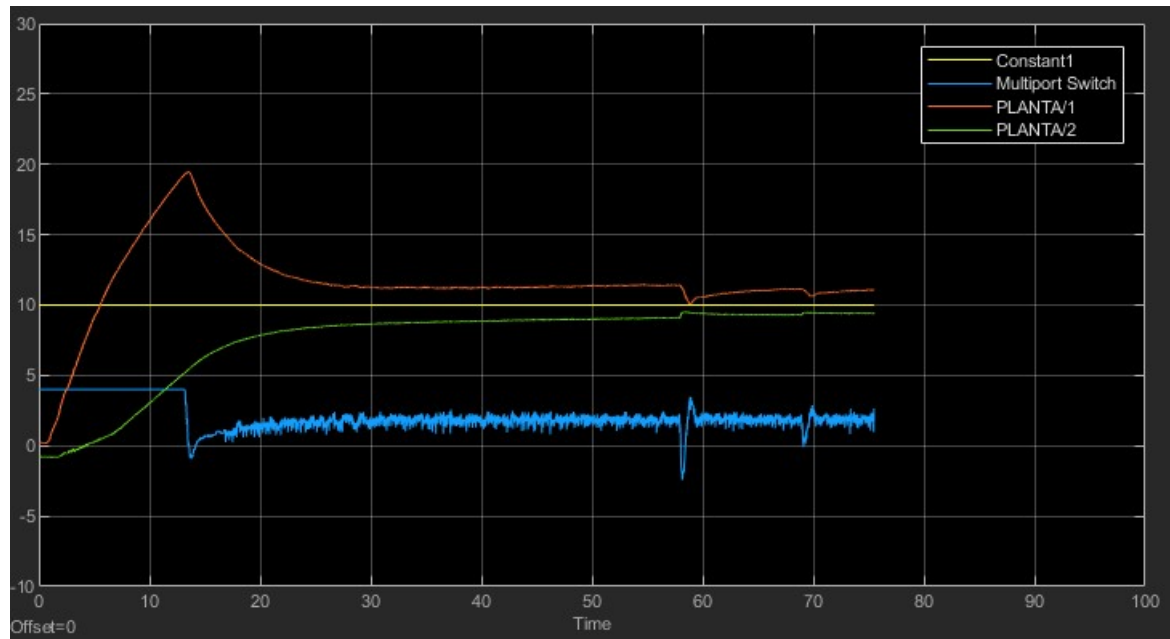
4.3.2 Controlador Mestre PI e Controlador Escravo Variando

Diferente das estruturas passadas, a adição do integrador no mestre proporciona maior velocidade no transitório, resultado em um *overshoot* maior e um menor erro em regime permanente. Como o objetivo é o controle do nível do tanque 2, o regime permanente do tanque 1 permanece acima do valor de referência. Entretanto, isso não é relevante afinal o proposito é controlar o tanque 2.

Nessa arquitetura do mestre fixo e variando o escravo, o melhor resultado foi o mostrado na Figura 20, em que o controlador escravo é constituído por um PI. Nessa arquitetura o erro em regime permanente chegou muito próximo do valor de referência.

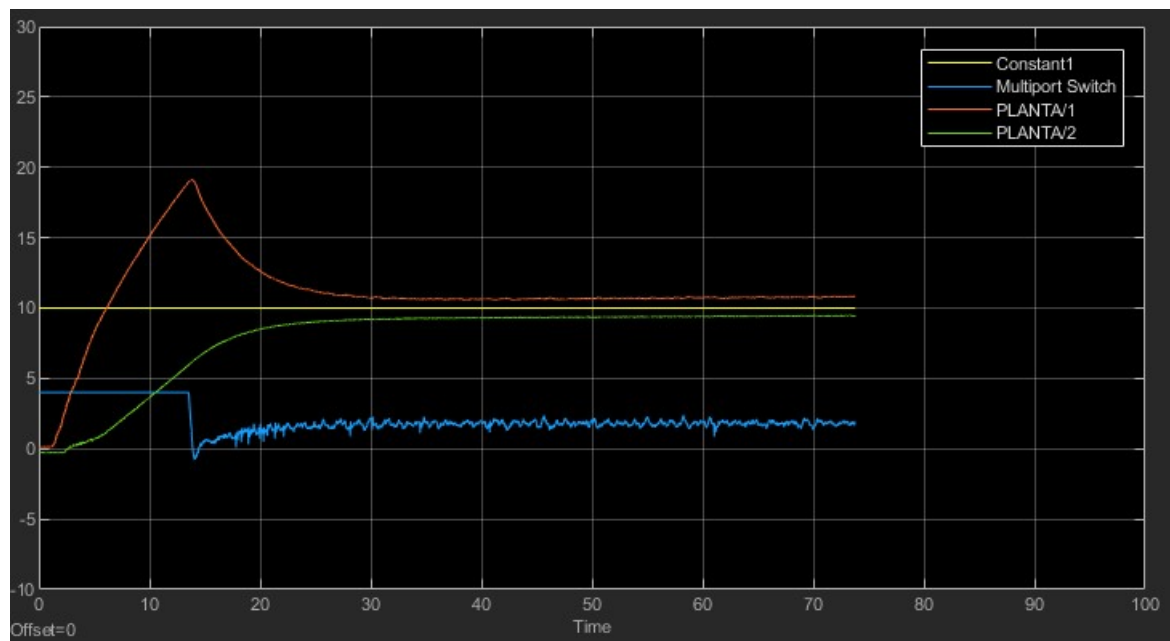
Também é possível observar, que tanto o nível do tanque 1 quanto o nível do tanque 2 se aproximaram mais do referencial. Algo que fica evidente ao comparar com a Figura 19, em que o escravo é um controlador proporcional.

Figura 19: Cascata de controlador PI com P



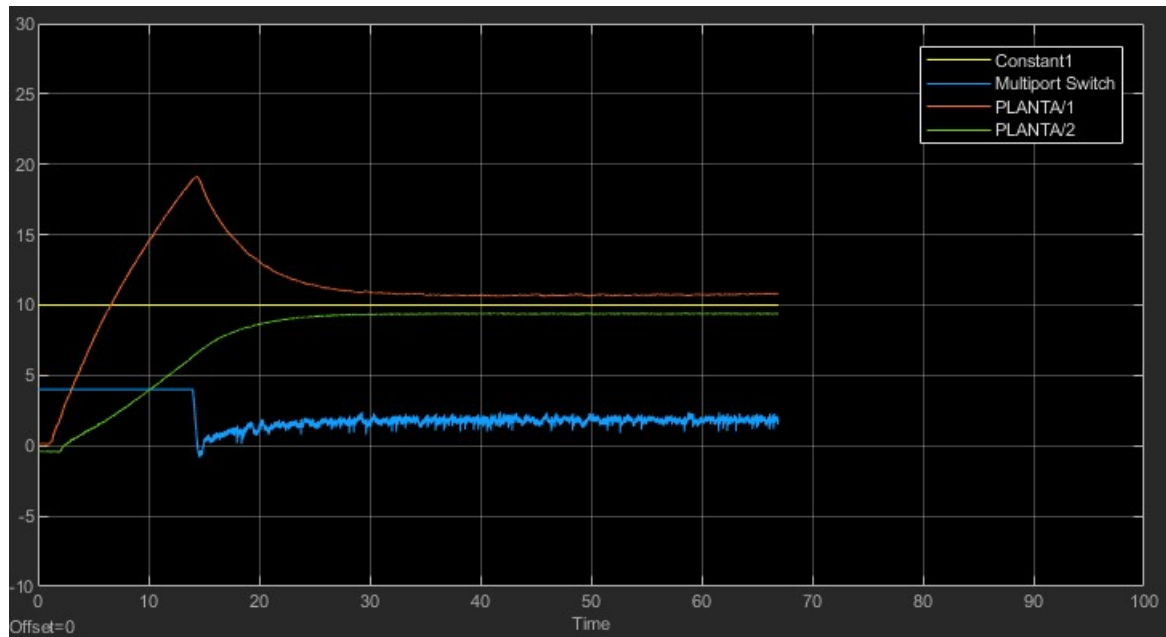
Fonte: Autores.

Figura 20: Cascata de controlador PI com PI



Fonte: Autores.

Figura 21: Cascata de controlador PI com PID

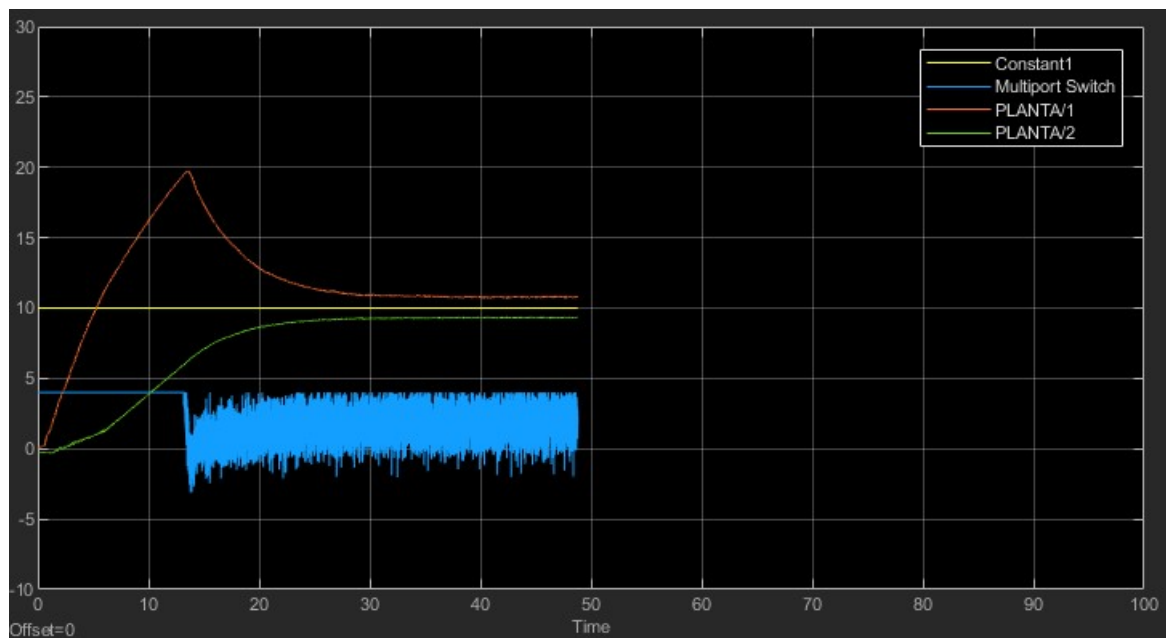


Fonte: Autores.

4.3.3 Controlador Mestre PID e Controlador Escravo Variando

Na arquitetura PID mestre e escravo variando, não foram observadas grandes diferenças em relação à arquitetura do mestre como PI. A diferença mais importante, foi o aumento do ruído no sistema devido a adição da ação derivativa ao controlador mestre.

Figura 22: Cascata de controlador PID com PID



Fonte: Autores.

5 CONCLUSÃO

No presente relatório, foi feito um estudo sobre o controle de sistemas dinâmicos através da simulação e análise dos Tanques Acoplados Quanser.

O entendimento dos conceitos das ações de controle proporcional (P), integral (I) e derivativa (D) permitiu que pudéssemos implementar os controladores P, PI, PD e PID com e sem os filtros da ação derivativa e *anti-windup* em sistemas de primeira e segunda ordem e em cascata. Assim, foi feito o controle do tanque 1 no laboratório A, do tanque 2 no laboratório B e do tanque 2 no laboratório C utilizando o conceito de mestre e escravo nos controladores.

Os testes dos sistemas de primeira e segunda ordem foram bem sucedidos, possibilitando controlar o tanque e entender o impacto; as vantagens e desvantagens ao adicionar cada ganho no sistema.

O resultado do sistemas em cascata, no entanto, não foi completamente satisfatório. A implementação dos filtros não gerou gráficos, nem comportamentos adequados. O que foi observado é que, apesar da mudança de valores, o tanque 1 não estabilizava em torno de um valor para controlar o nível tanque 2. Na verdade o tanque 1 se enchia completamente e depois esvaziava completamente, e após um tempo repetia o mesmo processo. Por essa razão não foi possível implementar o laboratório C completamente.

Referências

ADNORMAS. **A Qualidade dos dispositivos de intertravamento para a segurança em máquinas**. 2021. Acessado em: 26 jun. 2022. Disponível em: <<https://revistaadnormas.com.br/2021/04/13/a-qualidade-dos-dispositivos-de-intertravamento-para-a-seguranca-em-maquinas>>.

ARAÚJO, F. M. U. de. **SISTEMAS DE CONTROLE**. [S.l.]: CENTRO DE TECNOLOGIA, DEPTº. DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO, 2007.

BOJORGE, N. **Função de Transferência Processos de Primeira e Segunda Ordem**. 2022. Acessado em: 26 jun. 2022. Disponível em: <https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/08/Control_Aula04b_FT_2sem2017.pdf>.

CHORLEY RICHARD; HAGGETT, P. **Integrated Models in Geography (Routledge Revivals)**. [S.l.]: Routledge, 2013.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. [S.l.]: Blucher, 1999.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. [S.l.]: LTC, 2001.

MADEIRA, D. **Controlador integrativo**. 2016. Acessado em: 26 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/controlador-integral/>>.

_____. **Controlador PI estabilizando sistemas de primeira ordem**. 2016. Acessado em: 26 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/controlador-pi-primeira-ordem/>>.

_____. **Controlador proporcional**. 2016. Acessado em: 26 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/controlador-proporcional/>>.

PET. **Apostila de Matlab**. [S.l.]: Programa de Educação Tutorial, 2014.

QUANSER. **Homepage**. 2022. Acessado em: 8 mai. 2022. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/controlador-proporcional/>>.

RESPONDEAI. **Sistemas de primeira ordem**. 2022. Acessado em: 26 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.respondeai.com.br/conteudo/sistemas-de-controle/analise-de-sistemas-dinamicos-lineares/sistemas-de-primeira-ordem/1785>>.

SEBORG, D. E. e. a. **Process dynamics and control**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2016.