

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

**RELATÓRIO DA 2º EXPERIÊNCIA
CONTROLE PID PARA SISTEMAS DINÂMICOS**

TURMA 01
GRUPO: G6T120212

JHONAT HEBERSON AVELINO DE SOUZA: 20200000680

MARCOS FELIPE FERNANDES TEIXEIRA: 20200150220

ELIAS GURGEL DE OLIVEIRA : 20200001005

Natal-RN
2021

JHONAT HEBERSON AVELINO DE SOUZA: 20200000680

MARCOS FELIPE FERNANDES TEIXEIRA: 20200150220

ELIAS GURGEL DE OLIVEIRA : 20200001005

CONTROLE PID PARA SISTEMAS DINÂMICOS

Relatório apresentado a disciplina de Laboratório de Sistemas de Controle, correspondente a avaliação da 2º unidade do semestre 2021.2 do curso de Engenharia de Mecatrônica 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
2021

RESUMO

O seguinte trabalho da disciplina de Sistemas de Controle tem como intuito apresentar o desenvolvimento e os resultados obtidos no controle de sistemas dinâmicos por modelos de simulação computacional. Utilizou-se o *Simulink* do *Matlab* visando analisar e modificar o sistema de tanques acoplados já proposto. Inicialmente foi implementado o controlador PID para o nível do tanque 1 (sistema de primeira ordem), e verificou-se o comportamento do sistema para diferentes valores de ganhos. Em seguida, a mesma abordagem foi utilizada para o sistema de segunda ordem (nível do tanque 2), sendo também implementada a estratégia de controle em cascata. Foi verificada uma facilidade maior em controlar o sistema de primeira ordem em relação ao de segunda ordem, sendo esse último controlado também utilizando um controlador mestre-escravo.

Palavras-chave: **Sistemas de controle, sistema, tanques acoplados, Simulação computacional, Controlador PID.**

LISTA DE SÍMBOLOS

A_1	Área da base do tanque 1
A_2	Área da base do tanque 2
a_1	Área do orifício de saída do tanque 1 em cm^2
a_2	Área do orifício de saída do tanque 2 em cm^2
F_{1in}	Vazão de entrada do tanque 1
F_{1out}	Vazão de saída do tanque 1
F_{2in}	Vazão de entrada do tanque 2
F_{2out}	Vazão de saída do tanque 2
g	Aceleração da gravidade em cm/s^2
K_m	Constante da bomba
L_1	Taxa de variação do nível do tanque 1
L_1	Nível de água no tanque 1 em cm
L_2	Taxa de variação do nível do tanque 2
L_2	Nível de água no tanque 2 em cm
V'	Taxa de variação volumétrica
V_{out}	Velocidade com que o líquido escoa pelo tanque 1

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OUT1	Conexão hidráulica do tipo fechada 1
OUT2	Conexão hidráulica do tipo fechada 2

Lista de Figuras

1	Sistema realimentado.	18
2	Sistema de ação proporcional K_P .	19
3	Sistema de ação proporcional K_P e integrativo K_I .	19
4	Sistema de ação proporcional K_P e derivativo K_D .	20
5	Sistema de ação proporcional K_P , Integral K_I e Derivativo K_D , com filtros.	21
6	Sistema de segunda ordem com bloco de intertravamento.	22
7	Bloco de intertravamento.	23
8	Sistema de controle em cascata.	24
9	Resposta ao degrau.	25
10	Resposta ao degrau - Controlador de primeira ordem.	26
11	Gráfico evidenciando o ruído no sinal de saída do bloco saturador e do bloco $K_P = 15$.	26
12	Resposta a entrada senoidal - Controlador de primeira ordem.	27
13	Resposta a entrada degrau - Controlador de primeira ordem.	28
14	Resposta a uma entrada senoidal - Controlador de primeira ordem.	29
15	Ruído no sinal de saída do bloco saturador e do bloco $K_P = 2.0$ e $K_I = 2.0$.	29
16	Resposta a uma entrada degrau - Controlador de primeira ordem.	30
17	Resposta a uma entrada senoidal - Controlador de primeira ordem.	31
18	Resposta a uma entrada degrau - Controlador de primeira ordem - PID.	32
19	Resposta a uma entrada senoidal - Controlador de primeira ordem - PID.	33
20	Resposta a uma entrada degrau - filtro anti-reset - windup	33
21	Resposta a uma entrada senoidal - filtro anti-reset - windup	34
22	Resposta a uma entrada degrau - filtro na ação derivativa	34
23	Resposta a uma entrada senoidal - filtro na ação derivativa	35
24	Resposta a uma entrada degrau de amplitude 15 - controlador P de segunda ordem.	36
25	Resposta a uma entrada degrau de amplitude 15 - controlador PI de segunda ordem.	36
26	Resposta a uma entrada degrau de amplitude 15 - controlador PD de segunda ordem.	37
27	Resposta a uma entrada degrau de amplitude 15 - controlador PID de segunda ordem.	38
28	Configuração em cascata P-P	39
29	Configuração em cascata P-PI	39
30	Configuração em cascata P-PD	40
31	Configuração em cascata P-PID	40
32	Configuração em cascata PI-P	40
33	Configuração em cascata PI-P	41
34	Configuração em cascata PI-PI	41
35	Configuração em cascata PI-PD	41
36	Configuração em cascata PD-P	42
37	Configuração em cascata PD-PI	42
38	Configuração em cascata PID-P	43

39	Configuração em cascata PID-PI	44
----	--	----

Sumário

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO	12
2.1.1 MATLAB	12
2.1.2 Simulink	12
2.2 PLANTA DE CONTROLE	12
2.2.1 Quanser	12
2.3 Sistema de Tanques	12
2.4 AÇÕES DE CONTROLE	13
2.4.1 Controle Proporcional (P)	13
2.4.2 Controlador Proporcional + Integral (PI)	13
2.4.3 Controlador Proporcional + Derivativo (PD)	13
2.4.4 Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)	14
2.5 SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM	14
2.6 SISTEMAS DE SEGUNDA ORDEM	14
2.6.1 Sistemas subamortecidos	15
2.6.2 Sistemas criticamente amortecidos	15
2.6.3 Sistemas sobreamortecidos	15
2.7 FILTROS	16
2.7.1 Filtro da ação derivativa	16
2.7.2 Filtro <i>Anti-WindUp</i>	16
2.8 Definições gerais	16
3 METODOLOGIA	18
3.1 Sistema Realimentado	18
3.2 Sistema de Primeira Ordem	18
3.2.1 Ação Proporcional	19
3.2.2 Ação Integrativa	19
3.2.3 Ação Derivativa	20
3.2.4 Filtro da Ação Integrativa - anti- <i>reset-windup</i>	20
3.2.5 Filtro da Ação Derivativa	20
3.3 Sistema de Segunda Ordem	21
3.3.1 O intertravamento	22
3.4 Sistema de controladores em cascata	23
4 RESULTADOS	25
4.1 Sistema realimentado	25
4.2 Controladores de primeira ordem	25

4.2.1	Controlador Proporcional	25
4.2.1.1	Entrada Degrau	25
4.2.1.2	Entrada Senoidal	27
4.2.2	Controlador Proporcional e Integrativo	28
4.2.2.1	Entrada Degrau	28
4.2.2.2	Entrada Senoidal	28
4.2.3	Controlador Proporcional e Derivativo	30
4.2.3.1	Entrada degrau	30
4.2.3.2	Entrada Senoidal	31
4.2.4	Controlador Proporcional, Integrativo e Derivativo - PID	31
4.2.4.1	Entrada Degrau	31
4.2.4.2	Entrada Senoidal	32
4.2.5	Controlador Proporcional e Integrativo - Com filtro na ação Integrativa	33
4.2.5.1	Entrada Degrau	33
4.2.5.2	Entrada Senoidal	34
4.2.6	Controlador Proporcional e Derivativo - Com filtro na ação Derivativa	34
4.2.6.1	Entrada Degrau	34
4.2.6.2	Entrada Senoidal	35
4.3	Controle PID de Segunda Ordem	35
4.3.1	Controle proporcional - P	35
4.3.2	Controle proporcional e Integrativo - PI	36
4.3.3	Controle proporcional e Derivativo - PD	37
4.3.4	Controle proporcional Integral e Derivativo - PID	37
4.4	Comparação entre os sistemas de primeira e segunda ordem	38
4.5	Controle em cascata	39
4.5.1	Configuração P-Escravo	39
4.5.2	Configuração PI-P	39
4.5.3	Configuração PI-PI	39
4.5.4	Configuração PI-PD	40
4.5.5	Configuração PI-PID	41
4.5.6	Configuração PD-P	42
4.5.7	Configuração PD-PI	42
4.5.8	Configuração PD-PD	43
4.5.9	Configuração PD-PID	43
4.5.10	Configuração PID-P	43
4.5.11	Configuração PID-PI	43
4.5.12	Configuração PID-PD	44
4.5.13	Configuração PID-PID	44
4.6	Comparação entre os controladores de primeira e segunda ordem	44
5	CONCLUSÃO	45

1 INTRODUÇÃO

A atividade proposta consiste na implementação de controladores para alterar a dinâmica de um sistema de dois tanques acoplados. Diferentemente do primeiro experimento (em malha aberta), este novo experimento será realizado em malha fechada.

"Os sistemas de malha fechada têm, portanto, a vantagem de permitir uma redução dos efeitos da variação de parâmetros e um aumento na rejeição às perturbações. Porém há desvantagens, como a necessidade de incluir um elemento a mais no projeto do sistema (sensor), o que eleva o custo do mesmo, e também a possibilidade de instabilidade do sistema devido ao laço de realimentação."(MEDEIROS; MAITELLI, 2010)

Neste experimento será feito a implementação de controladores com ação proporcional (P), derivativo (D), integrativo (I), proporcional integrativo e derivativo (PID), bem como filtro na ação derivativa e filtro *anti-reset-windup*, com o intuito de observar o comportamento da saída do sistema (nível dos tanques) dada diferentes entradas. Com isso, será feita a comparação do efeito que cada um dos controladores e filtros exercem na resposta do sistema.

Dos controladores citados acima, o mais utilizado e conhecido é o controlador PID. A grande vantagem desse tipo de controlador é a versatilidade, pois é possível obter os outros tipos de controladores a partir dele regulando-se os ganhos proporcional (K_p), integrativo (K_i) e derivativo (K_d). Por exemplo, se for necessário obter um controlador PD a partir de um controlador PID, basta fazer o ganho integrativo (K_i) igual a zero e os outros ganhos (K_p e K_d) diferente de zero.

No estudo também foram abordados os sistemas de primeira e segunda ordem, sistemas Intertravamentos e controle em cascata que serão discutidos mais profundamente em diante.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

2.1.1 MATLAB

O MATLAB é um *software* de alta performance voltado para cálculo numérico. O MATLAB pode ser usado para análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos. A primeira versão foi escrita no final da década de 70 nas universidades do Novo México e Stanford visando fornecer suporte a cursos de teoria matricial, álgebra linear e análise numérica. O MATLAB é um sistema que permite resolução de problemas numéricos em apenas uma fração de tempo ao se comparar com programas semelhantes escritos em C, Fortran por exemplo. O elemento básico de informação usando no MATLAB é uma matriz que não requer dimensionamento. Além disso as soluções desses problemas são expressas como são escritas matematicamente

2.1.2 Simulink

Desenvolvida pela mesma companhia que o MATLAB, o *Simulink* é uma ferramenta de modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. É um *software* de diagramação gráfica por blocos. *Simulink* é usado em teoria de controle e processamento digital de sinais.

2.2 PLANTA DE CONTROLE

2.2.1 Quanser

A Quanser é uma empresa especializada em projetar e fabricar sistemas de tempo real de alta performance para o estudo e pesquisa nas áreas da controle, robótica e mecatrônica.

2.3 Sistema de Tanques

Os Sistemas de Tanques Acoplados da Quanser é um processo reconfigurável que permite a realização de experimentos de controle de diversos tipos. Consistindo de uma única bomba com dois tanques, é utilizado para estudos e pesquisas envolvendo experimentos com controle de nível de líquidos. Realizando uma descrição mais detalhada do sistema, temos que o mesmo é composto integralmente por 2 tanques, 1 reservatório, uma mini bomba d'água e tubos flexíveis para conexão. A bomba eleva o líquido, desde o reservatório, até 2 conexões hidráulicas normalmente fechadas, denominadas OUT1 e OUT2. O líquido presente no primeiro tanque passa para o segundo através de um orifício e sofre influência da gravidade que exerce sobre ele, em seguida o segundo recebe e devolve-o para o reservatório através de um orifício semelhante ao que se encontra no primeiro tanque. As configurações e os tanques presentes nele contam com um sensor de nível tipo elétrico em função da altura da coluna de líquido no respectivo tanque. Esses sensores irão variar de 0 a 4,8 V, cujos sistemas de aquisição de dados receberão sinais de controle entre -12 e 12V para a bomba ser acionada

2.4 AÇÕES DE CONTROLE

2.4.1 Controle Proporcional (P)

O controlador proporcional atua como um amplificador cujo ganho é definido pelo valor de K_p . No geral, o aumento de K_p diminui o erro de regime, porém acaba tornando o sistema mais oscilatório, podendo assim, instabilizá-lo.

A saída $u(t)$ no domínio do tempo para esse tipo de controlador é dada pela expressão:

$$u(t) = K_p e(t)$$

No domínio da frequência (Laplace), a equação de saída passa a ser:

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

O erro pode ser calculado através de:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

2.4.2 Controlador Proporcional + Integral (PI)

Adicionando-se a ação integral ao controlador acarretará no aumento do tipo do sistema em uma unidade, com isso, o erro de regime do sistema acabará sendo zerado. A adição de um polo e zero no sistema é a principal característica do controlador PI.

O controlador PI é utilizado quando se há uma resposta transitória aceitável e regime permanente insatisfatório.

Sua saída no domínio da frequência $U(s)$ será dada por:

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

Onde:

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$$

Em que τ_i é denominado de tempo integrativo ou tempo de reset.

2.4.3 Controlador Proporcional + Derivativo (PD)

Esse tipo de controlador é usado quando se há uma resposta transitória insatisfatória e uma resposta em regime permanente aceitável. Além disso, o controlador PD leva em consideração a taxa de variação do erro.

O controlador PD consegue introduzir um efeito antecipativo no sistema, isto faz com que o mesmo possa adotar uma medida de correção mais cedo, pois o sistema conseguirá reagir a tendências do erro em instantes futuros.

Sua resposta no domínio da frequência é dada por:

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

Nesse sistema, um zero acabará sendo adicionado em $z = \frac{-K_p}{K_d} = \frac{-1}{\tau_d}$, sendo τ_d a constante de tempo derivativa.

2.4.4 Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

O controlador PID é o tipo que é mais amplamente utilizado nas indústrias e é obtido a partir da combinação das três ações de controle citadas anteriormente (Proporcional, Integrativa e Derivativa). Seu uso se dá quando temos resposta transitória e resposta em regime insatisfatórias simultaneamente.

Este controlador também acaba adicionando um polo em $p=0$ e 2 zeros que irão depender dos parâmetros que forem utilizadas no projeto do controlador. Sua resposta no domínio da frequência (Laplace) será obtida através da equação:

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

2.5 SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM

A função de transferência de um sistema de primeira ordem é obtida através da equação:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}, \tau > 0$$

No sistema de primeira ordem haverá um polo em $p = -\frac{1}{\tau}$ e a resposta do sistema ao degrau será dada por:

$$y(t) = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), t \geq 0$$

O valor de τ corresponde a constante de tempo (tempo necessário para a resposta atingir 63,2% do valor de regime permanente).

2.6 SISTEMAS DE SEGUNDA ORDEM

A forma-padrão do sistema de segunda ordem possui a função de transferência de malha fechada dada por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

"O comportamento dinâmico do sistema de segunda ordem pode ser descrito em termos de dois parâmetros ξ e ω_n . Se $0 < \xi < 1$, os polos de malha fechada são complexos conjugados e se situam no semiplano esquerdo do plano s. O sistema é então chamado subamortecido, e a resposta transitória é oscilatória. Se $\xi = 0$, a resposta transitória não decai. Se $\xi = 1$, o sistema é denominado criticamente amortecido. Os sistemas superamortecidos correspondem a $\xi > 1$."(OGATA, 2011)

É possível obter os polos do sistema através de:

$$s = -\xi \omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}$$

2.6.1 Sistemas subamortecidos

O sistema em questão irá apresentar oscilações e possuirá um par de polos complexos conjugados.

Sua saída será dada por:

$$e(t) = 1 - \frac{e^{-\xi \omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \left(\omega_d t + \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) \right)$$

A frequência natural amortecida ω_d pode ser obtida através de:

$$\omega_d = \sqrt{1 - \xi^2}$$

A resposta, $c(t)$ no caso de o amortecimento ser nulo, pode ser obtida substituindo $\xi = 0$, fazendo com que a resposta passe a ser:

$$e(t) = 1 - \cos \omega_n t$$

2.6.2 Sistemas criticamente amortecidos

Neste caso, o sistema não possuirá mais oscilações e terá dois polos reais e iguais. Com isso, sua resposta a entrada degrau unitária será dada por:

$$e(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)$$

2.6.3 Sistemas sobreamortecidos

No caso sobreamortecido, o sistema se aproxima de um sistema de primeira ordem a medida que ξ aumenta, além de possuir dois polos reais e distintos. Sua saída para entrada degrau unitária será:

$$e(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left(\frac{e^{-S_1 t}}{S_1} - \frac{e^{-S_2 t}}{S_2} \right)$$

E seus polos serão:

$$S_1 = \left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega_n$$

$$S_2 = \left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \omega_n$$

2.7 FILTROS

2.7.1 Filtro da ação derivativa

Para evitar variações bruscas do *set point* e minimizar o ruído de leitura, se faz necessário implementar um filtro da ação derivativa. Com isso, o ruído dos sensores será enviado para o cálculo do erro, a partir daí ele sofrerá a derivação pela ação derivativa antes de ser amplificado.

2.7.2 Filtro Anti-WindUp

O filtro *Anti-WindUp* atua quando o sinal enviado difere do sinal calculado, atenuando-se assim, o valor da ação integrativa sobre o erro e evitando que o mesmo passe a crescer descontroladamente.

2.8 Definições gerais

1) "Tempo de subida, t_r : é o tempo requerido para que a resposta passe de 10 a 90%, ou de 5% a 95%, ou de 0% a 100% do valor final. Para sistemas de segunda ordem subamortecidos, o tempo de subida de 0% a 100% é o normalmente utilizado. Para os sistemas superamortecidos, o tempo de subida de 10% a 90% é o mais comumente utilizado."(OGATA, 2011)

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d}$$

Onde:

$$\beta = -tg^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$$

2) "Tempo de pico, t_p : é o tempo para que a resposta atinja o primeiro pico de sobressinal."(OGATA, 2011)

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$$

3) "Máximo sobressinal (em porcentagem), M_p : é o valor máximo de pico da curva de resposta, medido a partir da unidade. Se o valor final da resposta em regime permanente diferir da unidade, então é comum utilizar porcentagem máxima de sobressinal, definida por: "(OGATA, 2011)

$$M_p(\%) = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

Como:

$$c(t_p) = 1 + e^{-\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)}$$

Logo:

$$M_p(\%) = 100e^{-\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)}$$

4) "Tempo de acomodação, t_s : é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores em uma faixa (geralmente de 2% ou 5%) em torno do valor final, aí permanecendo indefidamente. O tempo de acomodação está relacionado à maior constante de tempo do sistema de controle. Pode-se determinar qual porcentagem deve ser utilizada no critério de erro a partir dos objetivos do projeto do sistema em questão. "(OGATA, 2011)

Utilizando-se o critério de 2%:

$$t_s = \frac{4}{\xi \omega_n}$$

Para o critério de 5%:

$$t_s = \frac{3}{\xi \omega_n}$$

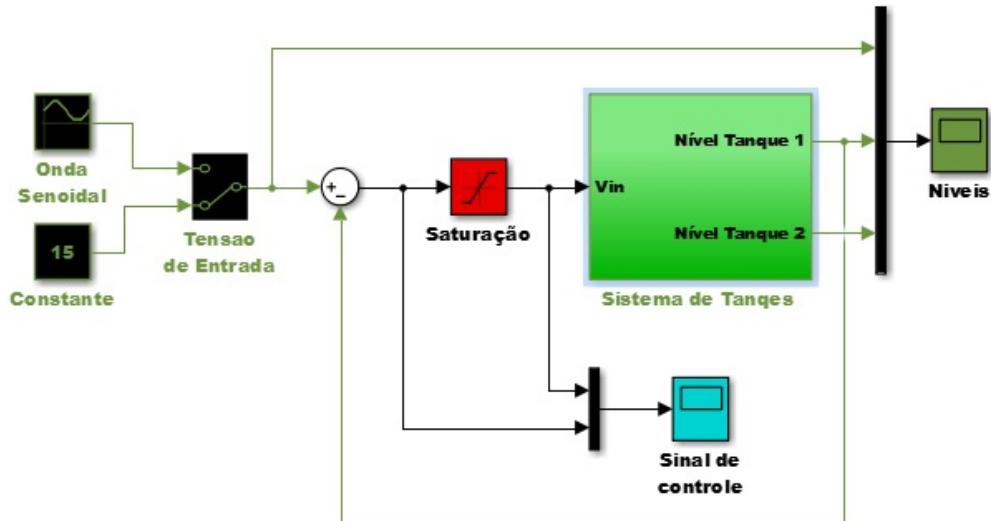
3 METODOLOGIA

Foi utilizado um modelo de simulação desenvolvido no MATLAB/Simulink® como base metodológica, o qual foi disponibilizado pelo professor Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo. Assim, no transcorrer das atividades esse sistema que modela um sistema de tanques acoplados de dois níveis será submetido a controladores de diferentes características e configurações variadas. De uma forma geral, os controladores utilizados serão de primeira ordem, de segunda ordem e na configuração mestre-escravo (cascata).

3.1 Sistema Realimentado

Antes de entrarmos no controlador de primeira ordem propriamente dito, foi considerado importante, para efeito comparativo, a implementação simples de um sistema realimentado. Este sistema possui um bloco comparador, que recebe o sinal de controle, *set point*, e o sinal de realimentação, e um bloco saturador, para manter o sinal de controle dentro dos limites segurança pré-estabelecidas, ou seja, sinal de tensão saturando em -4v e 4v e sem nenhum bloco de ganho K do erro, de forma a podermos observar o erro em regime permanente deste sistema. Além disso, os níveis dos sinais de ruído foram configurados para valores limitados a -0.1 e 0.1, para facilitar a observação dos testes, uma vez que sinais mais elevados podem ser desproporcionais as variações físicas vindas de sensores reais.

Figura 1: Sistema realimentado.



Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

3.2 Sistema de Primeira Ordem

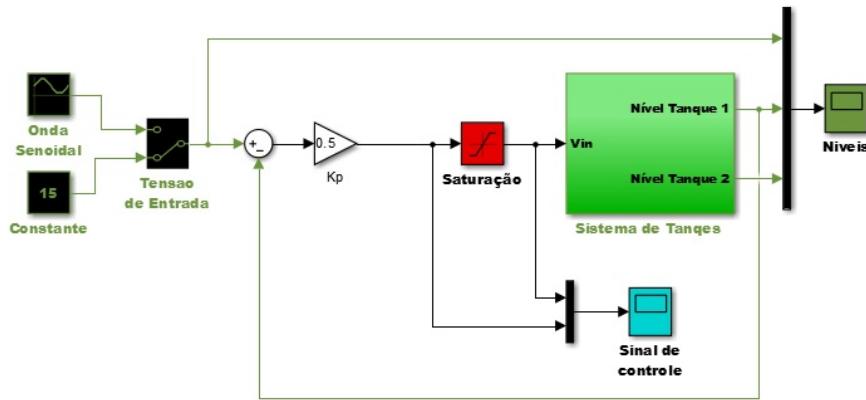
Para a construção de um sistema de primeira ordem, será tomado por base o sistema realimentado apresentado anteriormente, que já é em si um sistema de primeira ordem. Será mantida a configuração de saturação e de nível de ruído, contudo serão inseridas modificações que consistirão na

implementação dos blocos de fatores de ganho K e na implementação dos filtros de ação derivativa e anti-reset-windup. Com essas ações, objetiva-se que o nível do tanque 1 acompanhe o valor de referência, *set point*, de forma que seja evidenciado a funcionalidade do controlador.

3.2.1 Ação Proporcional

A ação proporcional é obtida inserindo-se um ganho configurável K_P entre o comparador e o bloco de saturação. A configuração de controlador proporcional **P** de primeira ordem é a de implementação mais simples entre os controladores.

Figura 2: Sistema de ação proporcional K_P .

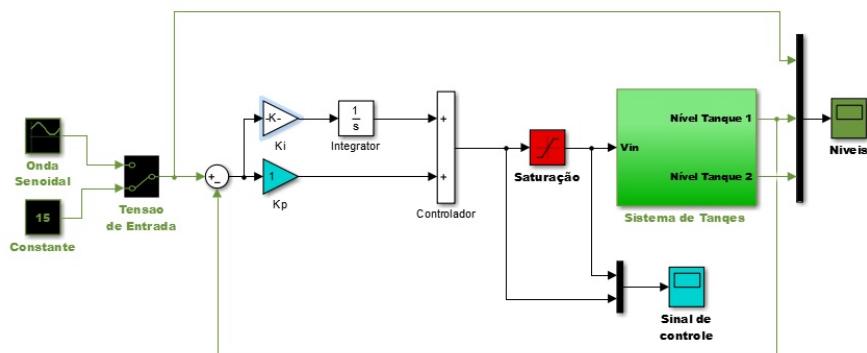


Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

3.2.2 Ação Integrativa

Para adicionar esta ação, foi necessário a inserção de um bloco de controle desse ganho K_I seguido por um bloco integrador, sendo o resultado final o produto entre estes blocos. Esse resultado é somado com o resultado do ganho proporcional e enviado ao saturador compondo o sinal de entrada do sistema, formando assim a estrutura de um controlador de primeira ordem do tipo **PI**.

Figura 3: Sistema de ação proporcional K_P e integrativo K_I .

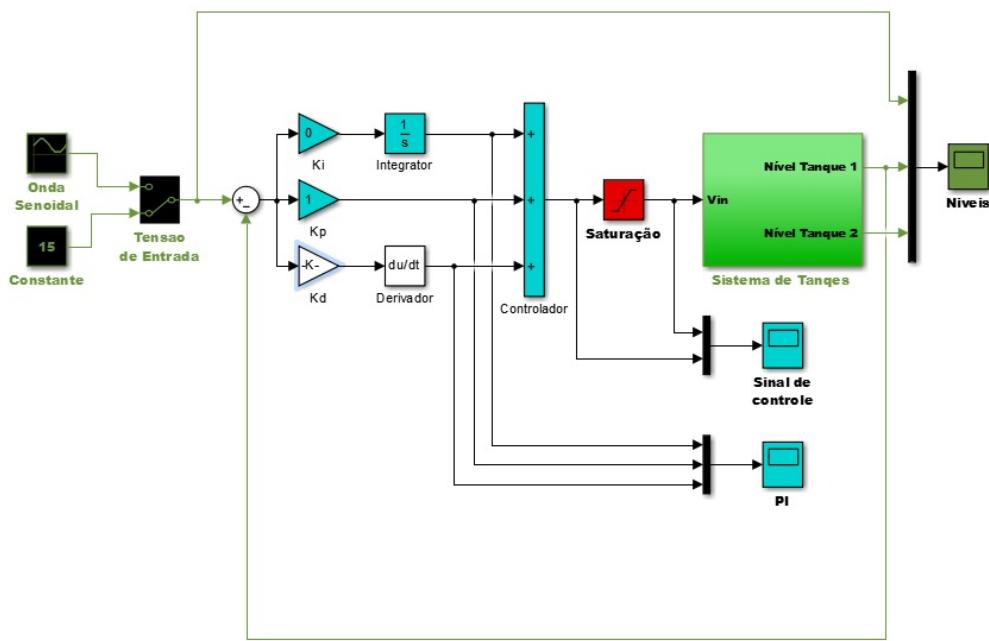


Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

3.2.3 Ação Derivativa

Esta ação foi adicionada de forma semelhante a ação integrativa, com a adição de um bloco derivador e um bloco para controle do ganho, K_D , dos valores da operação de derivação. Assim, o resultado do produto entre o K_D e o valor de saída do bloco derivador será somado aos valores proporcionais e integrativos. Contudo, para se ter um controlador K_D , já que o sistema está completo, o valor de K_I terá um valor zero para que se tenha um controlador **PD** de primeira ordem sem a interferência do fator integrativo. Podemos ver o resultado do esquema desenvolvido para essa configuração na Figura 4. Nesse cenário, também foi inserido um osciloscópio para monitorar o valor de cada parcela dos elementos que compõem o controlador. Isso será muito útil nas simulações futuras.

Figura 4: Sistema de ação proporcional K_P e derivativo K_D .



Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

3.2.4 Filtro da Ação Integrativa - anti-reset-windup

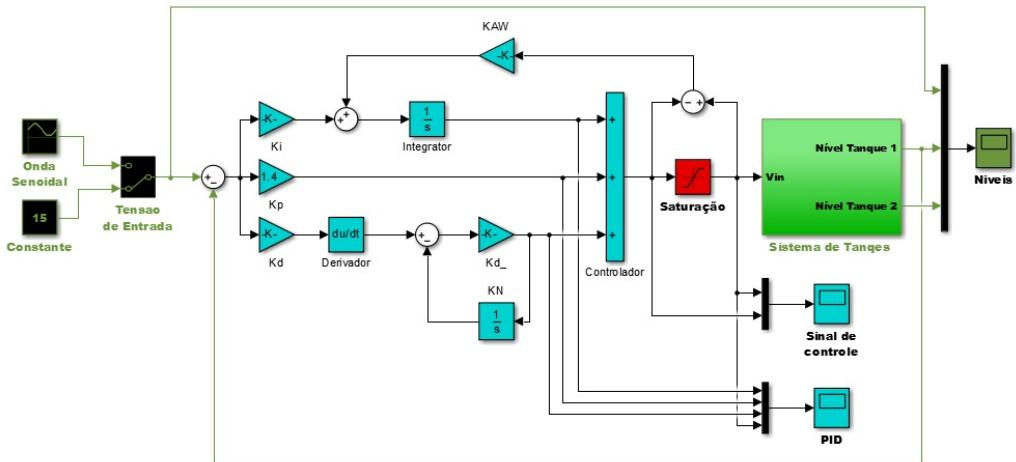
Para evitar um grande valor de saturação por conta da ação integrativa, há a necessidade da implementação de um filtro da ação integrativa. Sem ele o sistema pode ser levado a uma instabilidade considerável, com a saturação desnecessária dos atuadores. Comparando os valores antes e depois do saturador e considerando o ganho K_{AW} , a idéia é balancear o valor que chega ao bloco integrador, de forma que o sinal de saída deste, não cresça indefinidamente, o que ocorreria sem o mesmo. Essa implementação pode ser observada na figura 5.

3.2.5 Filtro da Ação Derivativa

Por necessidade semelhante ao filtro apresentado anteriormente, o objetivo aqui é diminuir os efeitos dos sinais de ruído na composição final do sinal que chega ao bloco saturador. Sem este filtro,

os sinais de ruído tendem a exercer uma forte influência na geração do sinal final. A implementação desse filtro pode ser observada também na Figura 5.

Figura 5: Sistema de ação proporcional K_P , Integral K_I e Derivativo K_D , com filtros.



Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

3.3 Sistema de Segunda Ordem

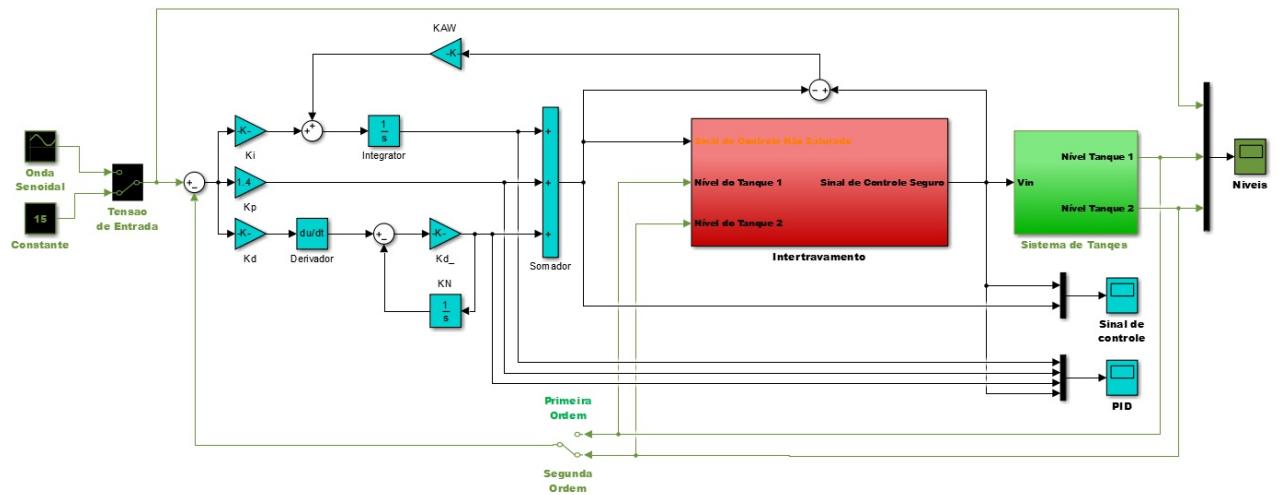
A principal diferença do sistema de primeira ordem para o de segunda é que, no caso do sistema de tanques acoplados, o objetivo agora é controlar o nível do tanque 2, sendo o nível deste o valor de comparação com o *set point*. Considerando isso, o nível do tanque 1 passa a ser apenas uma variável interna ao sistema, sem nenhuma atuação direta. No caso de sistemas automatizados, esse fato pode comprometer o funcionamento do conjunto, uma vez que o tanque 1 pode apresentar problemas como transbordamento. Em uma situação real, em uma indústria, isso pode representar uma catástrofe.

Na realidade, para qualquer automação, a equipe envolvida deve conhecer previamente o sistema a ser automatizado e ainda ter uma ampla visão do seu funcionamento, pois em um caso como este, deve ser previsto sistemas de segurança de forma a manter todo o processo, mesmo as variáveis internas, sob o total controle do sistema de automação. Para o sistema de tanques acoplados, nosso estudo de caso, foi desenvolvido um bloco de intertravamento. A montagem esquemática do sistema de segunda ordem com o bloco de intertravamento pode ser observada na Figura 6.

De fato, os sistemas de segunda ordem aparecem com bastante frequência nas indústrias de um modo geral, principalmente quando se monitora uma variável, como por exemplo, a temperatura de saída de um fluido de interesse em um trocador de calor do tipo casco e tubos, e o controlador atua no fluxo de vapor que entra nesse trocador como fonte de calor. Nesse caso, o controlador mestre, que será descrito posteriormente, monitora a temperatura de saída do fluido de interesse e, baseado na temperatura, define um *set point* para um controlador secundário, que também será definido posteriormente, e este, baseado no *set point* recebido do controlador primário, utiliza-se de seus blocos internos para definir a abertura da válvula que controla o fluxo de vapor. Este é um exemplo básico, porém ilustra com bastante propriedade as funcionalidades de um controlador de segunda ordem. Esse é um sistema bastante robusto que resolve o problema da variação na pressão do vapor, pois isso

poderia causar um sub ou superaquecimento do fluido de interesse se o controlador em questão fosse apenas de primeira ordem.

Figura 6: Sistema de segunda ordem com bloco de intertravamento.



Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

3.3.1 O intertravamento

Como regra geral, um sistema de intertravamento serve para, após um evento de perda de controle, conduzir e manter o processo em uma condição segura, "travando" todos os elementos finais de controle em posições pré-definidas em projeto e mantendo-os nessa condição até que o problema causador da perda de controle seja resolvido.

No caso em estudo, o bloco de intertravamento foi posicionado entre os controladores e a planta (sistema de tanques), ele é responsável por manter essa planta operando dentro das condições de segurança. O esquemático interno do bloco de intertravamento pode ser observado na Figura 7. É importante observar que esse bloco possui três entradas e uma saída, considerando isso, seu funcionamento será descrito a seguir.

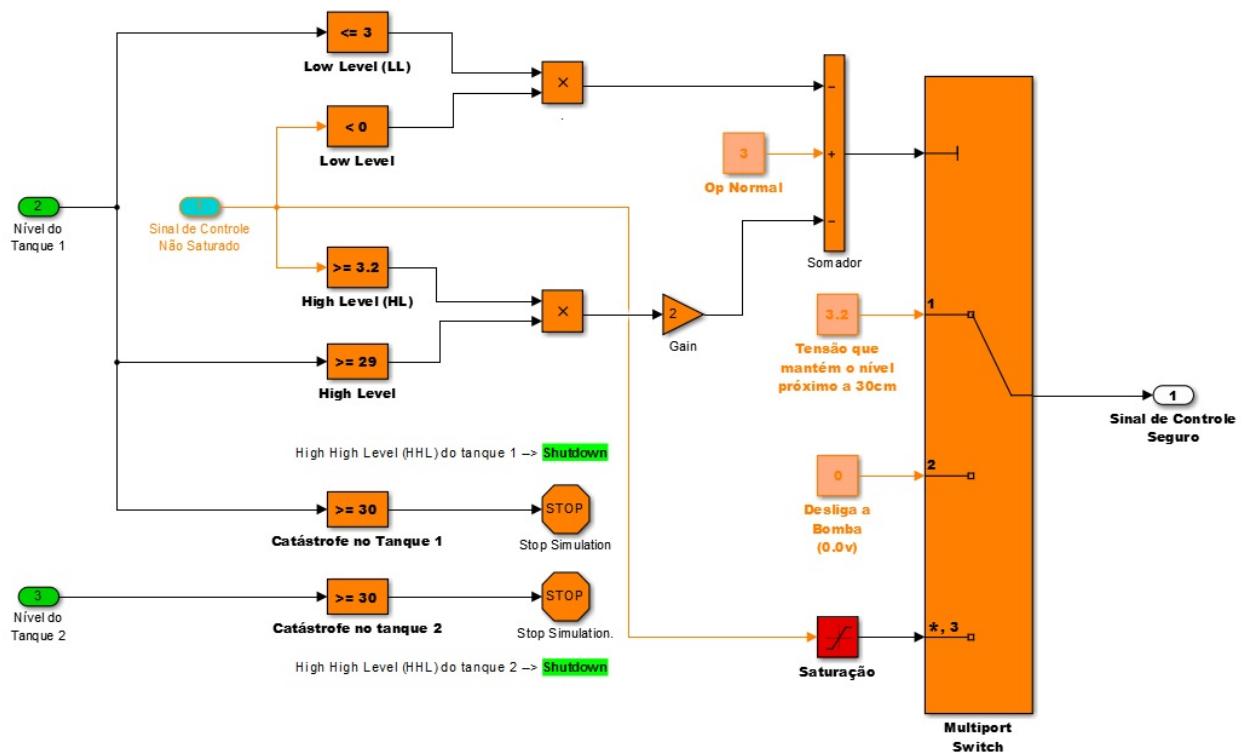
Uma chave seletora irá determinar qual sinal será enviado a saída. Essa decisão é tomada por um sistema, basicamente, combinacional e ocorre assim:

- Se todos os níveis estiverem dentro dos valores seguros para a operação, o sinal não saturado vindo do controlador é enviado ao saturador e em seguida enviado a saída para sensibilizar os atuadores da planta (no caso a bomba).
- Se qualquer um dos dois tanques exceder o limite máximo de segurança, ou seja, nível maior ou igual a trinta, o funcionamento da planta será interrompido por uma parada de emergência *Shutdown*.
- Se o nível do tanque 1 for maior ou igual a 29 e o sistema de controle estiver enviando um sinal não saturado maior ou igual a 3.2 V, o sistema enviará para a saída um sinal de 0.0 V, desligando a bomba.
- Se o nível do tanque 1 for menor ou igual a 3 e o sistema de controle estiver enviando um sinal não saturado menor que 0.0 V, o sistema enviará para a saída um sinal de 3.2 V, mantendo o

tanque 1 em um nível próximo a 30 cm.

Como já mencionado antes, essas são definições tomadas para este projeto. Em outras situações o projetista pode escolher outros valores e outras estratégias. Tudo depende da dinâmica e da modelagem do sistema físico em questão, pois há uns sistemas que requerem ações rápidas e outros que requerem ações mais lentas, sob o risco de comprometer a estabilidade funcional do mesmo. Além disso, os atuadores possuem limites físicos que não podem ser ultrapassados sob o risco de danos, é o caso dos motores de passo, por exemplo, que possuem um limite de corrente para suas bobinas. Correntes excessivas podem comprometer esses motores.

Figura 7: Bloco de intertravamento.



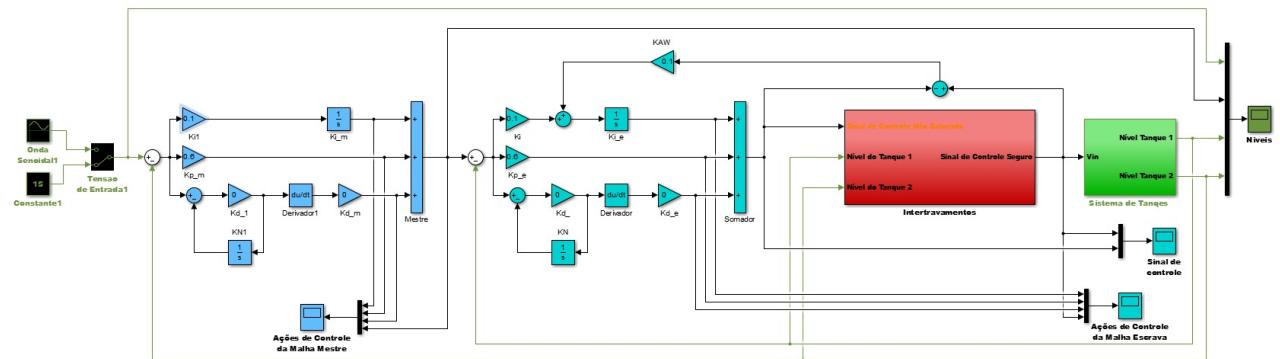
Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

3.4 Sistema de controladores em cascata

No caso de sistemas em cascata, considerando os controladores de segunda ordem, haverá dois controladores trabalhando em conjunto: um mestre (o controlador principal) e um escravo (o controlador secundário). O objetivo do controlador mestre é fornecer um *set point* para o controlador escravo baseado no erro de referência entre o nível atual do tanque 2 e o valor desejado para este nível. O controlador escravo recebe o *set point* vindo do controlador mestre e o compara com uma variável interna, no caso o nível do tanque 1. Com base no erro existente entre este e o nível do tanque 1, define o valor do sinal que deverá ser enviado ao atuador, nesse caso, a bomba. Na Figura 8 pode ser observado o esquemático de um controlador mestre-escravo, este também servirá de base para a elaboração dos resultados colhidos para este relatório.

É importante lembrar, de acordo com o mencionado anteriormente, que o bloco de saturação, interno ao bloco de intertravamento, serve como elemento de proteção para a bomba, mantendo limitado o sinal de tensão em seus terminais e, consequentemente, a corrente que circula pelas suas bobinas.

Figura 8: Sistema de controle em cascata.



Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

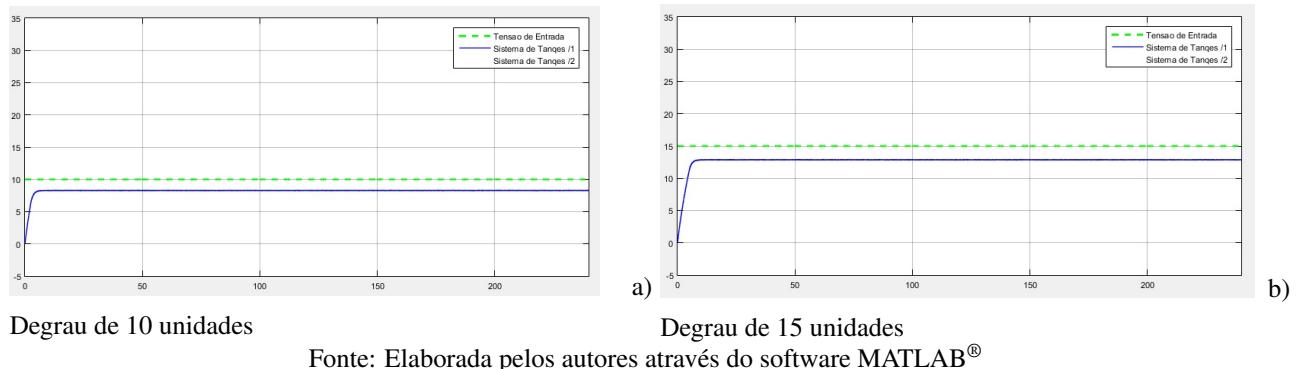
4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações efetuadas, indicando os critérios adotados assim como os valores utilizados em cada passo.

4.1 Sistema realimentado

Para este sistema foram desenvolvidas apenas duas simulações com a entrada consistindo apenas em um degrau de amplitudes diferentes. Foi pensado dessa forma pois, como veremos adiante, esse sistema tem o mesmo comportamento que um controlador proporcional de ganho unitário.

Figura 9: Resposta ao degrau.



Observações:

Note na Figura 9 que o erro de regime permanente é proporcional a amplitude do degrau e, independentemente do valor deste, o erro nunca é anulado. Além disso, quando o degrau possui uma menor amplitude o sistema atinge o seu ponto de regime permanente em uma fração de tempo menor do que o sistema que possui um degrau de maior amplitude.

4.2 Controladores de primeira ordem

Os controladores de primeira ordem contém basicamente um controle que pode ser **P**, **PI**, **PD** ou **PID**. Em nossos ensaios, estes serão submetidos a entradas do tipo degrau e senoidal para que seja observado as diferenças no comportamento de cada tipo de controlador evidenciando suas curvas características o que é resultado direto da sua lei de controle.

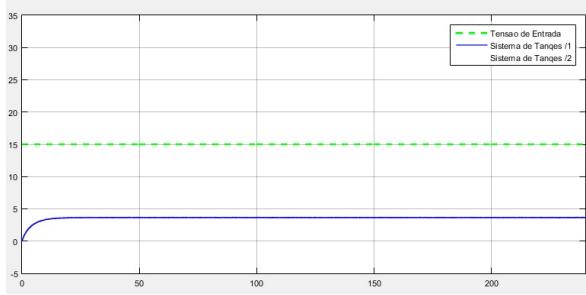
4.2.1 Controlador Proporcional

Para a configuração de ganho apenas proporcional, foram utilizadas entradas (*set point*) do tipo degrau e senoidal, os resultados serão apresentados na sequencia.

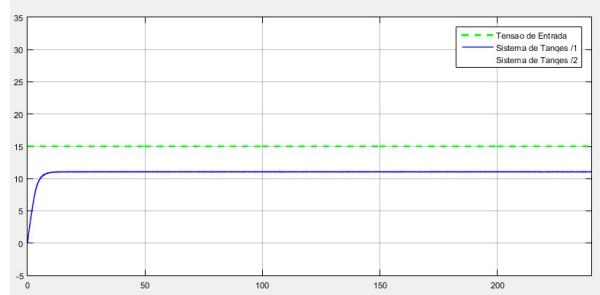
4.2.1.1 Entrada Degrau

O *set point* utilizado foi 15 e os ganhos K_P foram: 0.1, 0.5, 1, 2, 5 e 15, conforme pode ser visto nos gráficos de resposta ao degrau constantes na Figura 10.

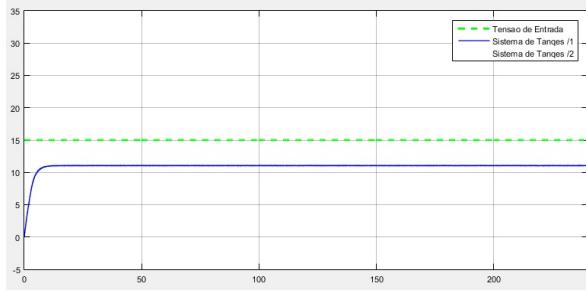
Figura 10: Resposta ao degrau - Controlador de primeira ordem.



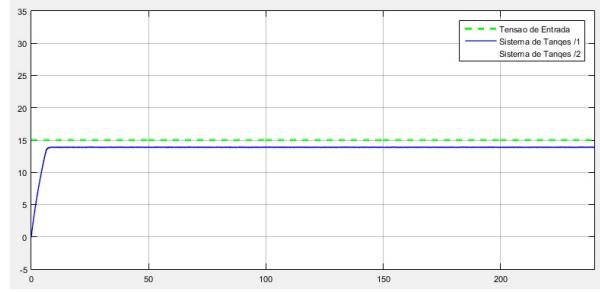
a) Ganho proporcional $K_p = 0.1$



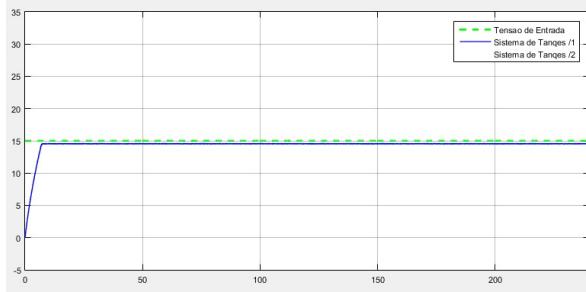
b) Ganho proporcional $K_p = 0.5$



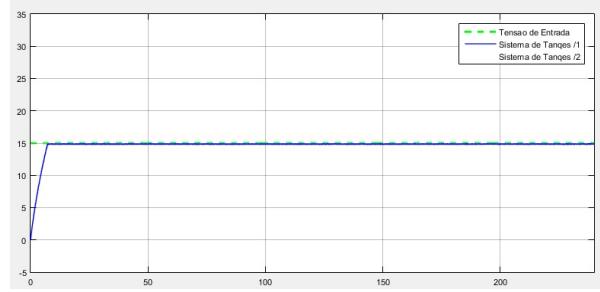
c) Ganho proporcional $K_p = 1$



d) Ganho proporcional $K_p = 2$



e) Ganho proporcional $K_p = 5$

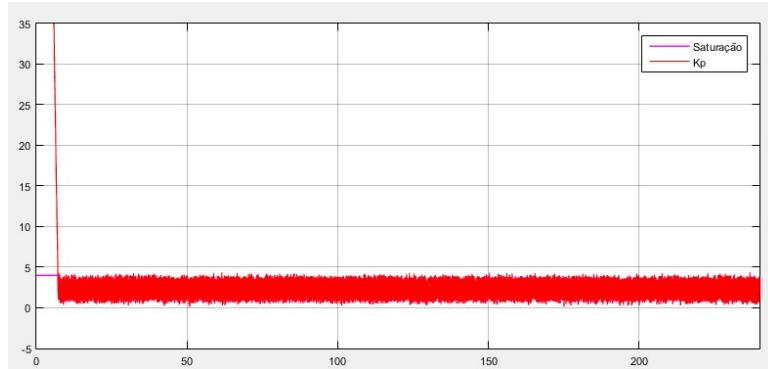


f) Ganho proporcional $K_p = 15$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

É importante notar que quanto maior o valor de K_p , mais próximo do *set point* o sistema operará, contudo haverá amplificação dos sinais de ruído, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11: Gráfico evidenciando o ruído no sinal de saída do bloco saturador e do bloco $K_p = 15$.



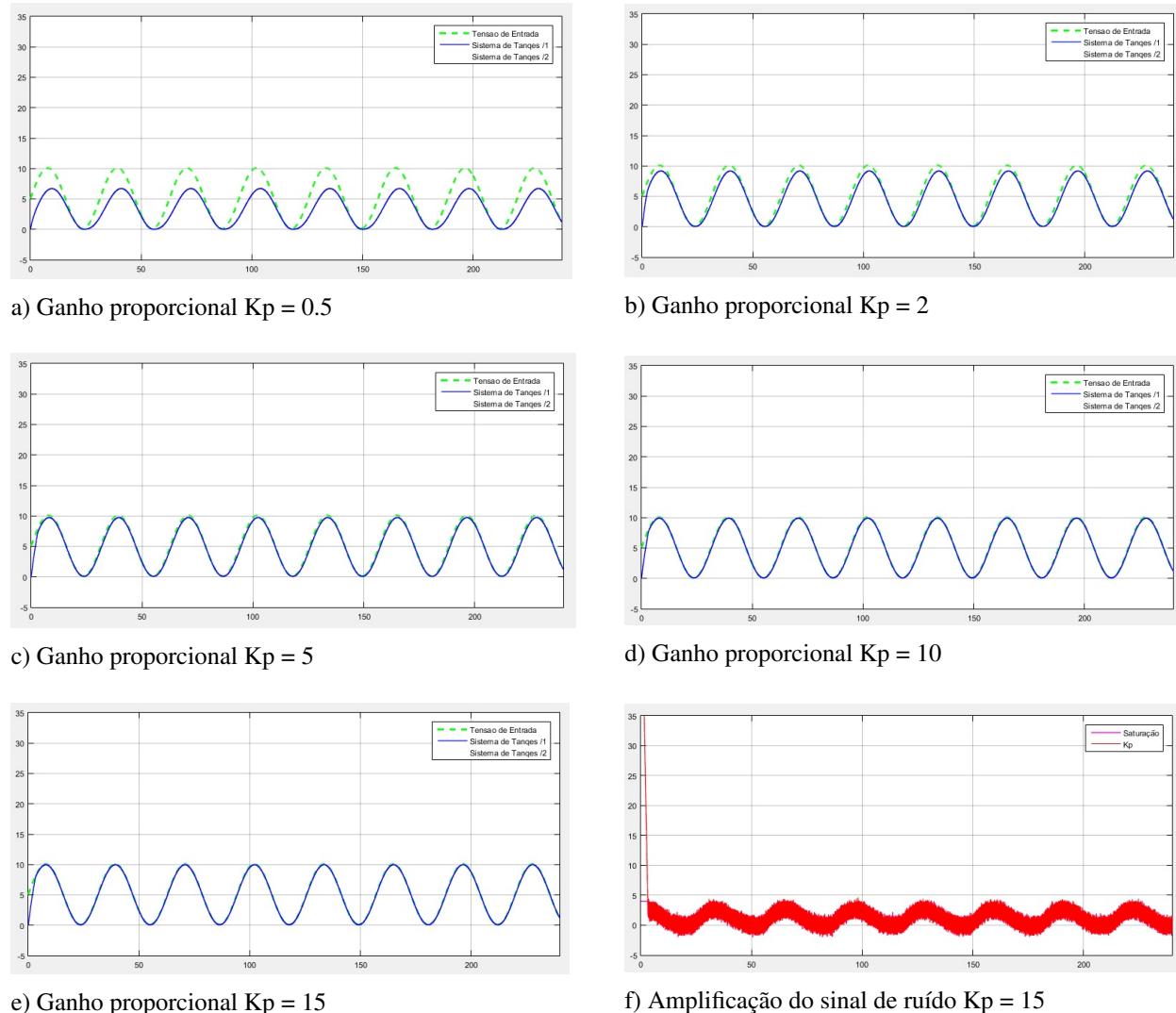
Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Para um sistema mais sensível, essa amplificação de ruído pode ser desastrosa.

4.2.1.2 Entrada Senoidal

Para a simulação de um sistema de entrada senoidal foram utilizados os seguintes ganhos: 0.5, 2, 5, 10 e 15, conforme pode ser observado na Figura 12.

Figura 12: Resposta a entrada senoidal - Controlador de primeira ordem.



Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Assim como na resposta ao degrau, observa-se que ao aumentar-se o ganho K_P , o sistema tende a seguir melhor *set point*, contudo há também a amplificação do ruído conforme Figura 12-f.

Observações:

Com o resultado obtido para as entradas degrau e senoidal, nota-se que o aumento do ganho K_P implica em uma melhor resposta do sistema no sentido de seguir melhor a referência (*setpoint*), contudo o sistema também aumentou proporcionalmente o ruído o que pode implicar em uma pequena instabilidade e na movimentação frenética e desnecessária dos atuadores.

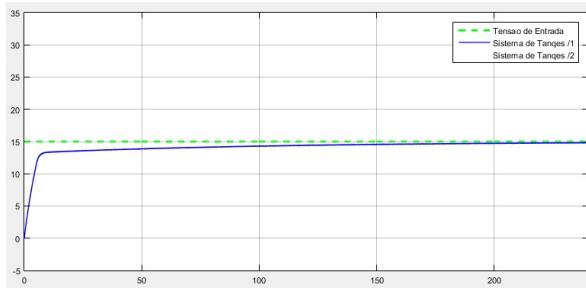
4.2.2 Controlador Proporcional e Integrativo

O controlador proporcional e integrativo possui características melhores do que o controlador puramente proporcional. Esse fato pode ser observado nas Figuras 13 e 14.

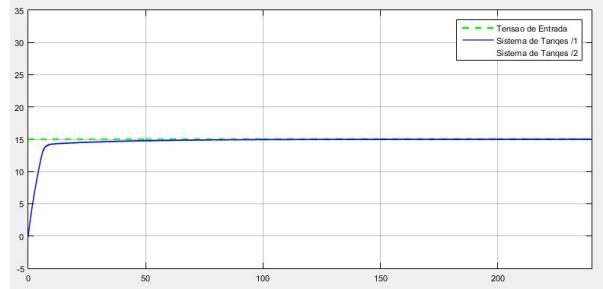
4.2.2.1 Entrada Degrau

Para o controlador em questão, mantendo-se inicialmente o ganho K_P em 1, foram testados os seguintes valores para K_I : 0.01, 0.03, 0.05, 1. Além disso, também foi utilizada a configuração $K_P = 2$ e $K_I = 5$. O resultado dessas combinações podem ser observados nos gráficos da Figura 13 a seguir.

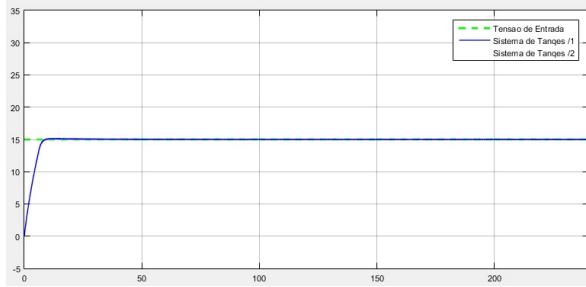
Figura 13: Resposta a entrada degrau - Controlador de primeira ordem.



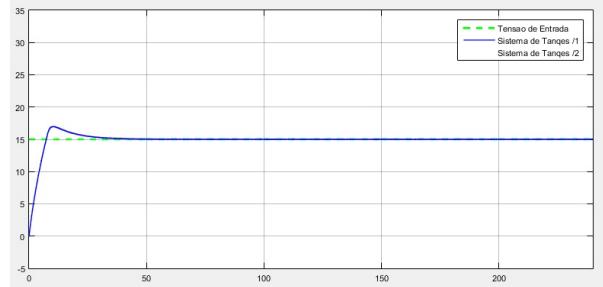
a) Controlador PI, com $K_P = 1$ e $K_I = 0.01$



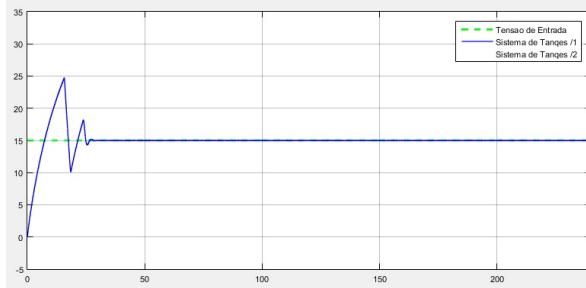
b) Controlador PI, com $K_P = 1$ e $K_I = 0.03$



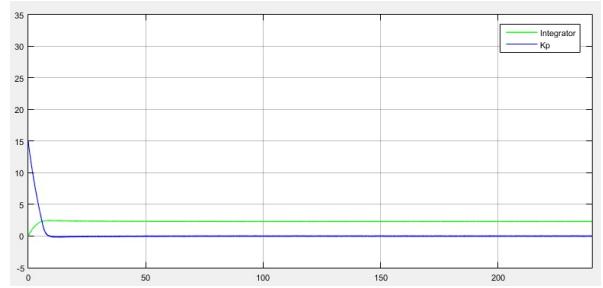
c) Controlador PI, com $K_P = 1$ e $K_I = 0.05$



d) Controlador PI, com $K_P = 1$ e $K_I = 1.0$



e) Controlador PI, com $K_P = 2.0$ e $K_I = 5.0$

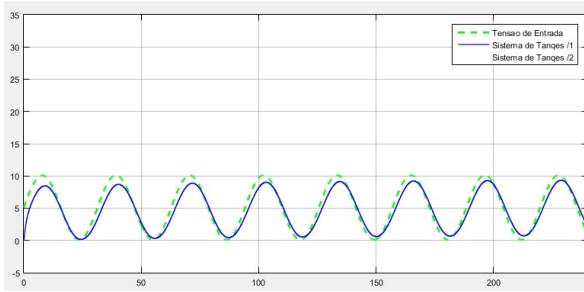


Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

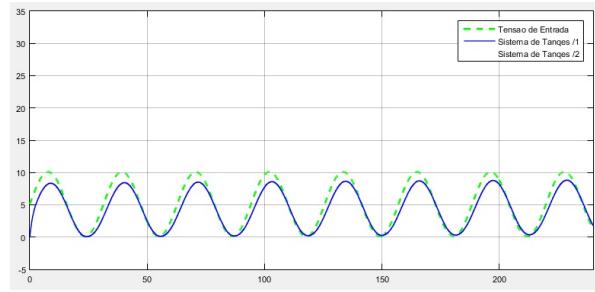
4.2.2.2 Entrada Senoidal

Para o controlador em questão, mantendo-se inicialmente o ganho K_P em 1, foram testados os seguintes valores para K_I : 0.01, 0.03, 0.05, 1. Além disso, também foi utilizada a configuração $K_P = 2$ e $K_I = 5$. O resultado dessas combinações podem ser observados nos gráficos da Figura 13 a seguir.

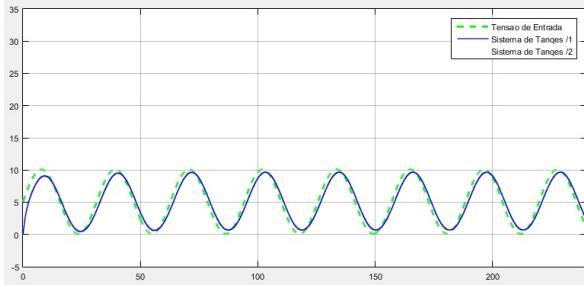
Figura 14: Resposta a uma entrada senoidal - Controlador de primeira ordem.



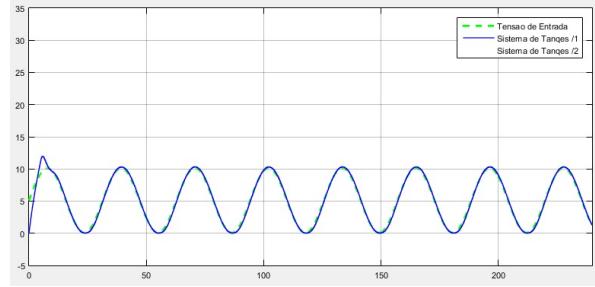
a) Controlador **PI**, com $K_P = 1$ e $K_I = 0.01$



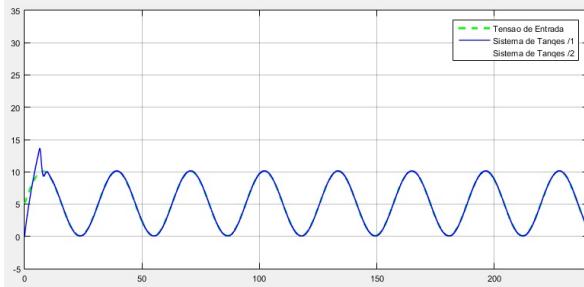
b) Controlador **PI**, com $K_P = 1$ e $K_I = 0.03$



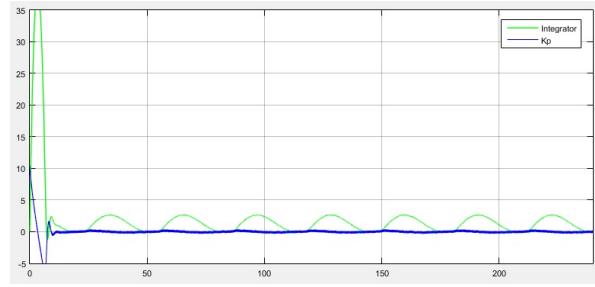
c) Controlador **PI**, com $K_P = 1$ e $K_I = 0.05$



d) Controlador **PI**, com $K_P = 1$ e $K_I = 1.0$



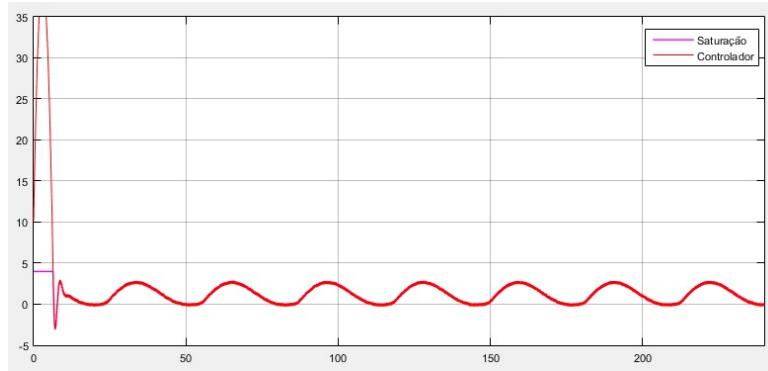
e) Controlador **PI**, com $K_P = 2.0$ e $K_I = 5.0$



f) Controlador **PI**, com $K_P = 1.0$ e $K_I = 0.05$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Figura 15: Ruído no sinal de saída do bloco saturador e do bloco $K_P = 2.0$ e $K_I = 2.0$.



Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Observações:

Nos gráfico das Figuras 13 e 14 nota-se que tanto para a entrada degrau quanto para a entrada senoidal, o nível do tanque 1 acompanha o *set point* de forma mais eficiente, contudo, como já

observado, ao aumentar-se consideravelmente o valor de K_P , aumenta-se também o ruído, porém, ao aumentar-se demasiadamente o valor de K_I o sistema apresenta uma resposta mais enérgica, de forma a ultrapassar o valor de referência (*setpoint*) passando a apresentar sobressinal (*overshoot*). Todavia ao diminuir K_I irá diminuir também o efeito da parcela integrativa e o controlador irá tender a um controlador de ação apenas proporcional. Considerando isso, o objetivo é buscar estabelecer valores de forma a deixar a resposta mais rápida e eficiente e ainda provocar pouco ou nenhum sobressinal.

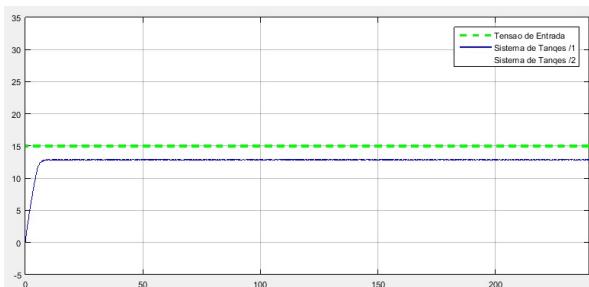
4.2.3 Controlador Proporcional e Derivativo

Como observaremos, os controladores **PD** podem não ser muito eficientes dependendo do tipo do sistema.

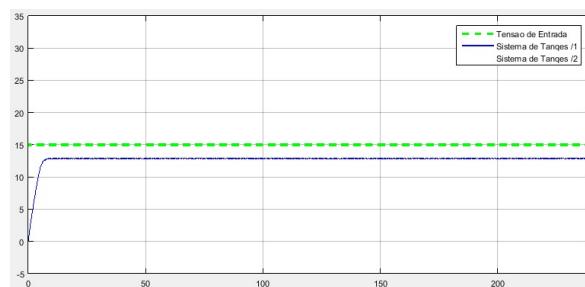
4.2.3.1 Entrada degrau

Na Figura 16 são mostrados alguns resultados para a entrada degrau.

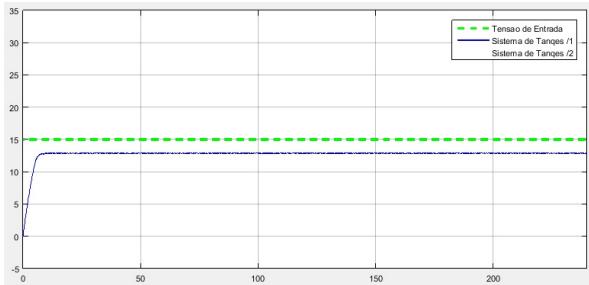
Figura 16: Resposta a uma entrada degrau - Controlador de primeira ordem.



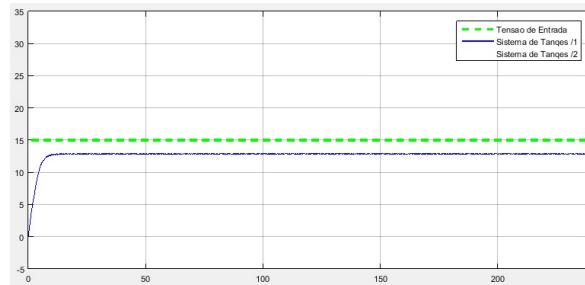
a) Controlador **PD**, com $K_P = 1$ e $K_D = 0.01$



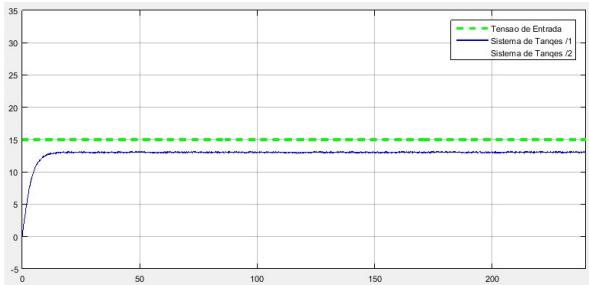
b) Controlador **PD**, com $K_P = 1$ e $K_D = 0.03$



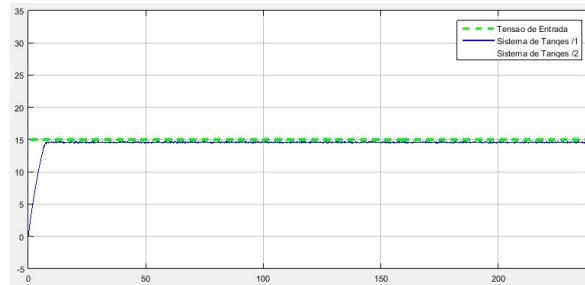
c) Controlador **PD**, com $K_P = 1$ e $K_D = 0.05$



d) Controlador **PD**, com $K_P = 1.0$ e $K_D = 1.0$



e) Controlador **PD**, com $K_P = 1.0$ e $K_D = 2.0$



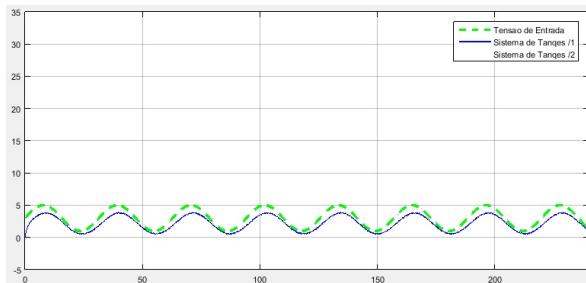
f) Controlador **PD**, com $K_P = 2.0$ e $K_I = 2.0$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

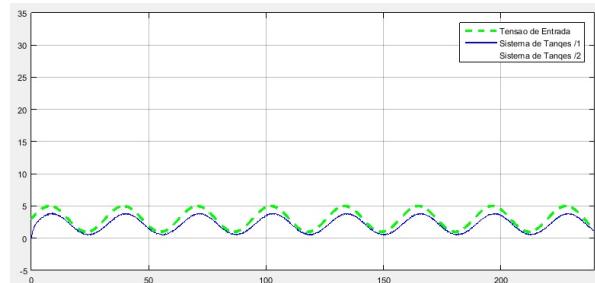
4.2.3.2 Entrada Senoidal

Da mesma forma que para a entrada degrau, na Figura 17 são mostrados alguns resultados obtidos para a uma entrada senoidal.

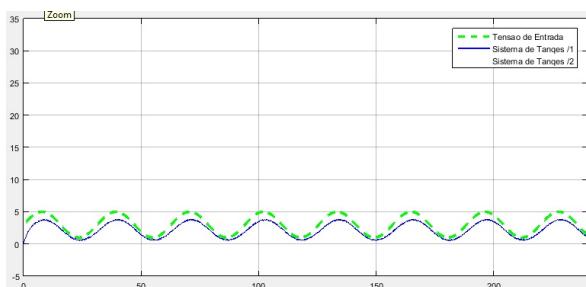
Figura 17: Resposta a uma entrada senoidal - Controlador de primeira ordem.



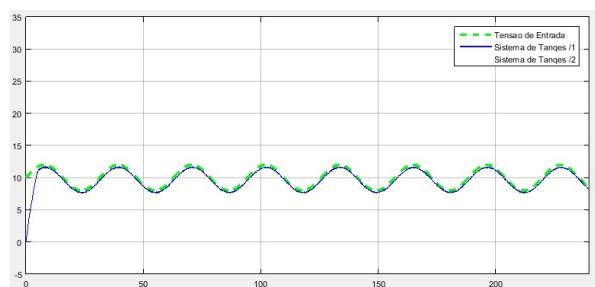
a) Controlador **PD**, com $K_P = 1$ e $K_D = 0.03$



b) Controlador **PD**, com $K_P = 1$ e $K_D = 0.05$



c) Controlador **PD**, com $K_P = 1.0$ e $K_D = 1.0$



d) Controlador **PD**, com $K_P = 5.0$ e $K_D = 1.5$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Observações:

Considerando o controlador em questão, nota-se que quanto maior o K_P , maior será a proximidade do *setpoint* e quanto maior o K_D maior será o ruido nos atuadores, o que pode causar uma pequena instabilidade ao sistema. Esses ruídos não aparecem no resultado dos níveis, mas estão presentes nos atuadores. Esse fato será melhor abordado posteriormente.

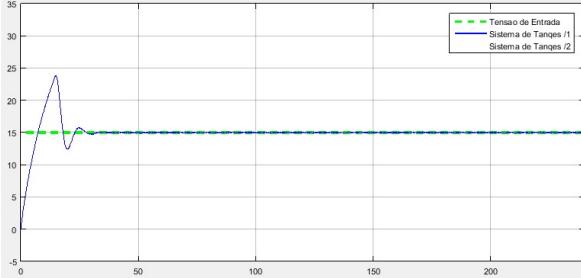
4.2.4 Controlador Proporcional, Integrativo e Derivativo - PID

O controlador do tipo PID apresenta juntas todas as características vistas até aqui. Em seguida serão apresentados alguns resultados colhidos para este controlador, utilizando entradas do tipo degrau e senoidal.

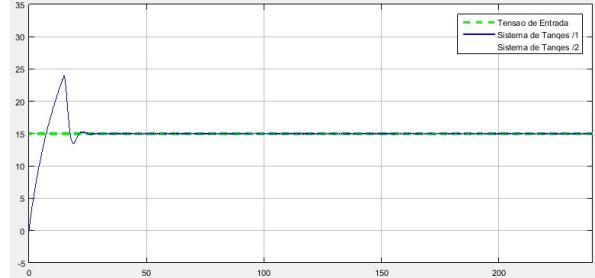
4.2.4.1 Entrada Degrau

A exemplo das simulações anteriores, na Figura 18 são apresentados alguns resultados considerando uma entrada do tipo degrau. Até aqui, falávamos de sinais de ruídos, os mesmos são apresentados nas Figuras 18-e e 18-f. A explicação desses ruídos e do lugar onde os mesmos aparecem será dada nas observações.

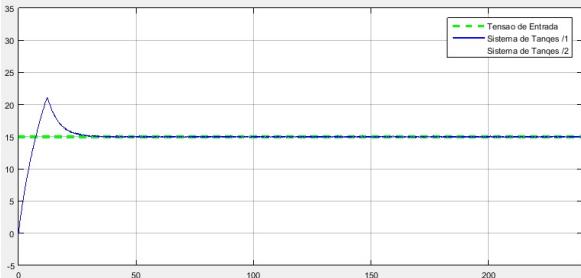
Figura 18: Resposta a uma entrada degrau - Controlador de primeira ordem - PID.



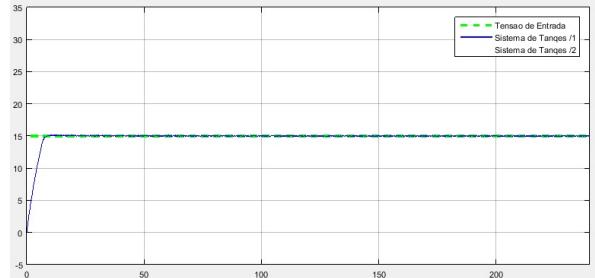
a) Controlador **PID** - $K_P = 1$, $K_I = 1$ e $K_D = 1$



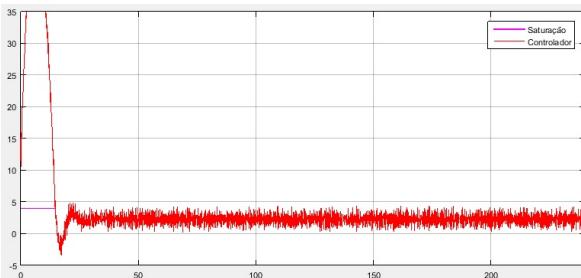
b) Controlador **PID** - $K_P = 1$, $K_I = 1$ e $K_D = 0.02$



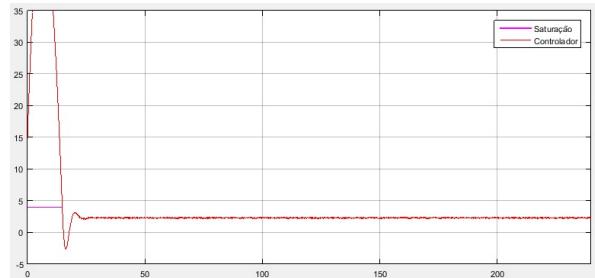
c) Controlador **PID** - $K_P = 5$, $K_I = 1$ e $K_D = 0.02$



d) Controlador **PID** - $K_P = 1.5$, $K_I = 0.05$ e $K_D = 0.02$



e) Ruído **PID** - $K_P = 1$, $K_I = 1$ e $K_D = 1$



f) Ruído **PID** - $K_P = 1$, $K_I = 1$ e $K_D = 0.02$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

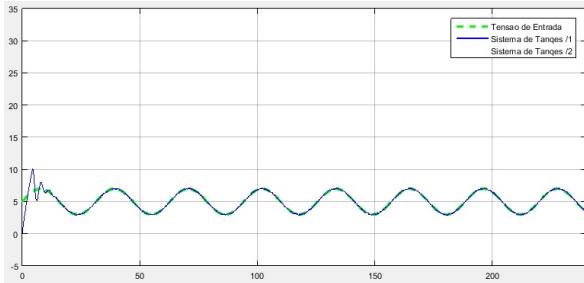
4.2.4.2 Entrada Senoidal

Seguindo os princípios anteriores, serão apresentados alguns resultados para a entrada senoidal, e como já se conhece algumas condições de contorno, será apresentado uma menor quantidade de gráficos na Figura 19.

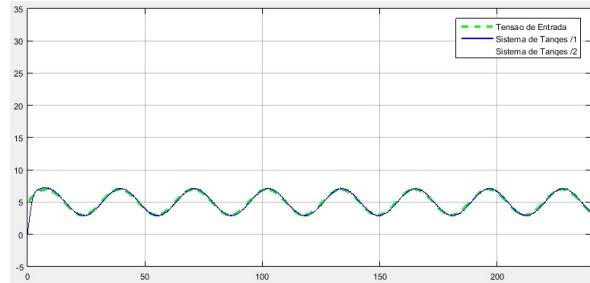
Observações:

Através das Figuras 18 e 19 fica evidente que este controlador corresponde a uma combinação dos controladores apresentados anteriormente, ou seja, o comportamento do controlador **PID** consiste na combinação das ações individuais dos controladores **P**, **PI** e **PD**, de forma que para se obter sistemas mais rápidos ou mais lentos, com ou sem sobressinal e com uma menor oscilação, basta seguir as recomendações apresentadas anteriormente, com relação aos ajustes de K_P , K_I e K_D . Além disso, através da Figuras 18-e, 18-f, 19-c e 19-d, foi observado o efeito de um valor maior ou menor para o componente K_D . observe que esse efeito pode não aparecer no nível do tanque, já que a média do mesmo é zero, no entanto ele aparece no sinal que é enviado ao atuador, que nesse caso é a bomba,

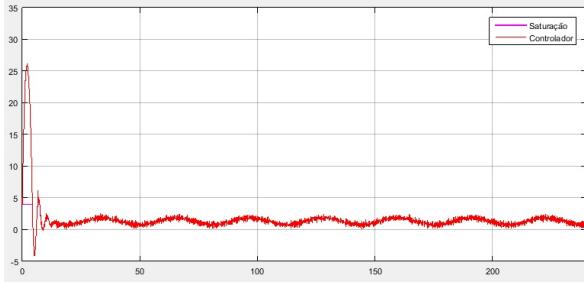
Figura 19: Resposta a uma entrada senoidal - Controlador de primeira ordem - PID.



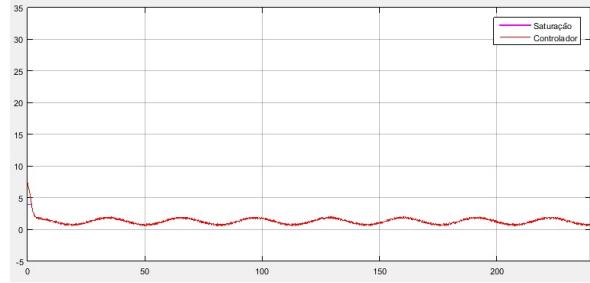
a) Controlador **PID** - $K_P = 1$, $K_I = 5$ e $K_D = 0.3$



b) Controlador **PID** - $K_P = 1.5$, $K_I = 0.5$ e $K_D = 0.01$



c) Controlador **PID** - $K_P = 1$, $K_I = 5$ e $K_D = 0.3$



d) Controlador **PID** - $K_P = 1.5$, $K_I = 0.5$ e $K_D = 0.01$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

o que pode comprometê-la prematuramente, devendo ser evitado.

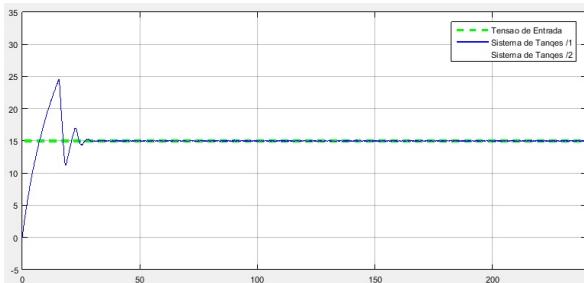
4.2.5 Controlador Proporcional e Integrativo - Com filtro na ação Integrativa

No sentido de evitar a saturação da ação integrativa, em seguida será apresentado nas Figuras 20 e 21 os resultados da ação de um filtro da ação integrativa ou filtro anti-reset – *windup*.

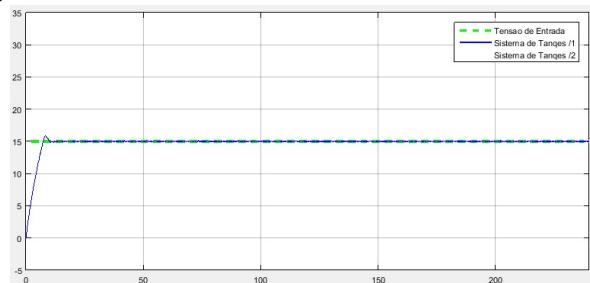
4.2.5.1 Entrada Degrau

Para a entrada degrau foi testado um conjunto de valores com e sem filtro, conforme Figura 20.

Figura 20: Resposta a uma entrada degrau - filtro anti-reset – *windup*



a) Controlador **PI** - $K_P = 1$, $K_I = 2$ e $K_{AW} = 0$



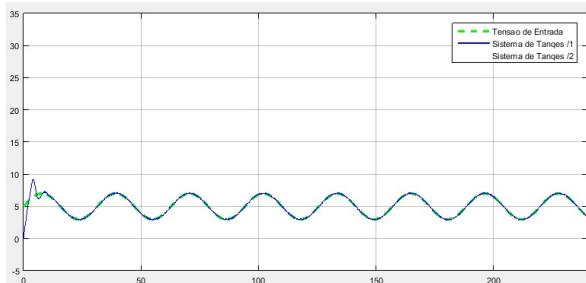
b) Controlador **PI** - $K_P = 1$, $K_I = 2$ e $K_{AW} = 1$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

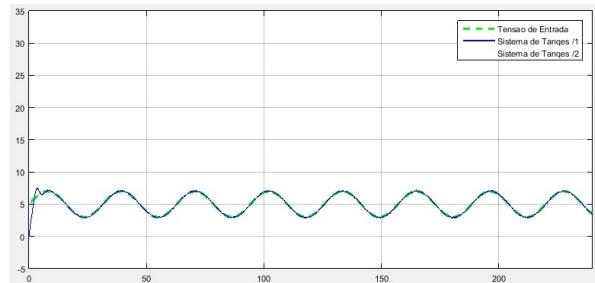
4.2.5.2 Entrada Senoidal

Da mesma forma que para a entrada degrau, foi testado um conjunto de valores com e sem filtro, o resultado encontra-se na Figura 21

Figura 21: Resposta a uma entrada senoidal - filtro anti-reset – windup



a) Controlador PI - $K_P = 1$, $K_I = 2$ e $K_{AW} = 0$



b) Controlador PI - $K_P = 1$, $K_I = 2$ e $K_{AW} = 1$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Observações:

Tanto para a entrada degrau quanto para a entrada senoidal, fica evidente a ação do filtro anti-reset – windup, mostrando a ocorrência de um menor *overshoot*. Esse efeito era esperado uma vez que o filtro age justamente atenuando a ação integrativa, evitando que esta cresça descontroladamente.

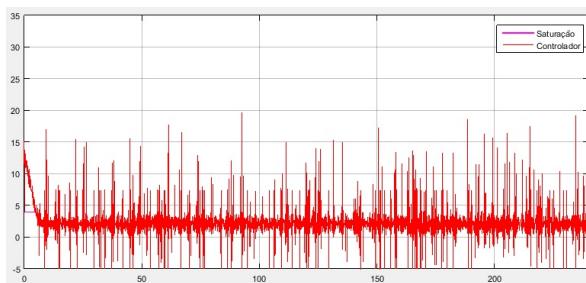
4.2.6 Controlador Proporcional e Derivativo - Com filtro na ação Derivativa

Na sequencia, será realizado um teste de um filtro de ação derivativa em um controlador PD, verificando-se o sinal na entrada do atuador com e sem filtro.

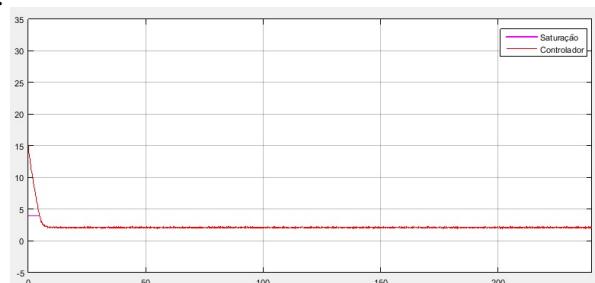
4.2.6.1 Entrada Degrau

Na Figura 22 estão os gráficos do sinal na entrada do atuador com e sem filtro na ação derivativa.

Figura 22: Resposta a uma entrada degrau - filtro na ação derivativa



a) Controlador PD - $K_P = 1$, $K_D = 1$ e $K_N = \text{off}$



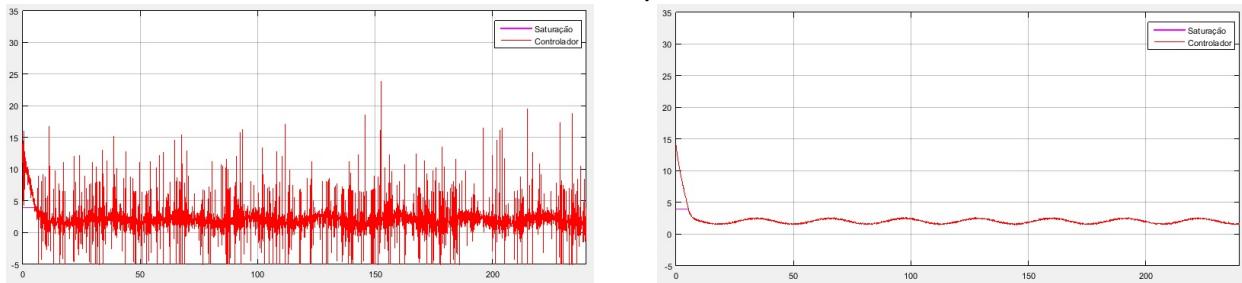
b) Controlador PD - $K_P = 1$, $K_D = 1$ e $K_N = 0.03$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

4.2.6.2 Entrada Senoidal

Da mesma forma que para a entrada degrau, na Figura 23 estão os gráficos do sinal na entrada do atuador com e sem filtro na ação derivativa, para uma entrada senoidal.

Figura 23: Resposta a uma entrada senoidal - filtro na ação derivativa



a) Controlador **PD** - $K_P = 1$, $K_D = 1$ e $K_N = \text{off}$

b) Controlador **PD** - $K_P = 1$, $K_D = 2$ e $K_N = 0.03$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Observações:

Considerando ambas as entradas, o uso filtro derivativo com baixos valores para K_N , resulta em um sinal pouco ruidoso para os mesmos valores de K_P e K_D . Esse resultado era esperado, uma vez que o uso do filtro da ação derivativa evita que o ruído seja derivado e amplificado.

4.3 Controle PID de Segunda Ordem

O objetivo agora é mostrar as ações dos controladores **P**, **PI**, **PD** e **PID**, mas com relação ao nível do tanque 2, ou seja, as ações de controle de segunda ordem. Para tanto será analisado entradas do tipo degrau onde manteremos um valor de *setpoint* (referência) fixo em 15. Com isso, serão observados os comportamentos do sistema e suas curvas características para cada lei de controle. Além disso, esses novos resultados serão comparados com os já obtidos na seção anterior, quando foi analisado o sistema de primeira ordem.

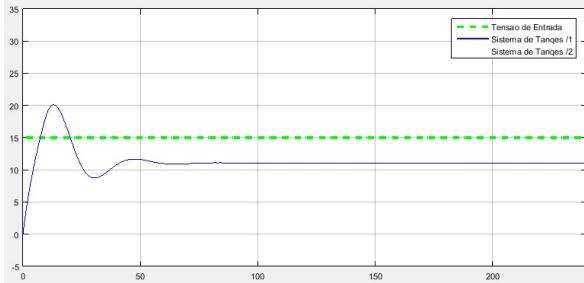
4.3.1 Controle proporcional - P

Para este controlador foram testados para K_P , os valores: 0.5, 1, 5 e 10. os resultados podem ser vistos na Figura 24

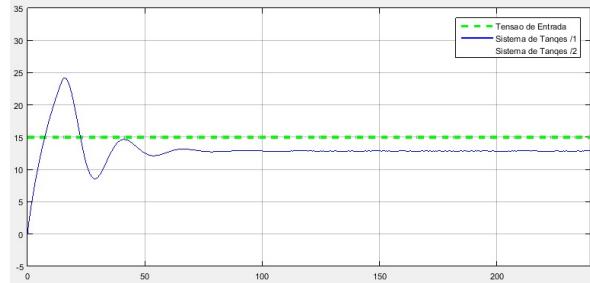
Observações:

Semelhante aos sistemas de primeira ordem, observa-se que o aumento no ganho K_P faz com que o nível do tanque 2 opere cada vez mais próximo ao valor de referência *setpoint*. Contudo, aumentando-se a velocidade com o objetivo de atingir o regime permanente mais rápido, faz com que o sistema oscile em demasia antes de atingir o regime permanente. Esse pode ser um efeito bastante indesejado, principalmente em se tratando de sistemas críticos.

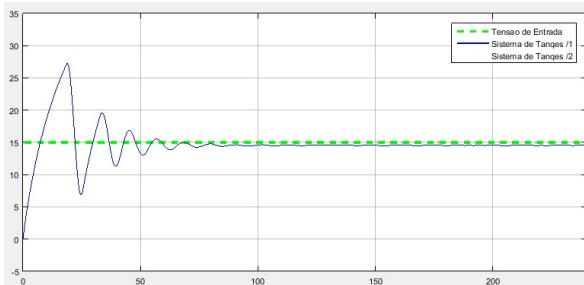
Figura 24: Resposta a uma entrada degrau de amplitude 15 - controlador **P** de segunda ordem.



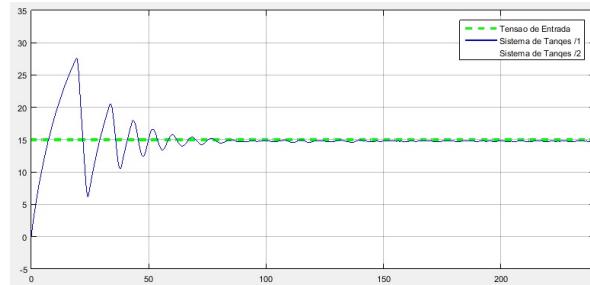
a) Controlador **P** com $K_P = 0.5$



b) Controlador **P** com $K_P = 1.0$



c) Controlador **P** com $K_P = 5.0$



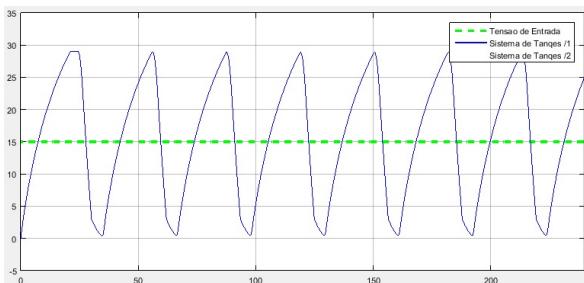
d) Controlador **P** com $K_P = 10$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

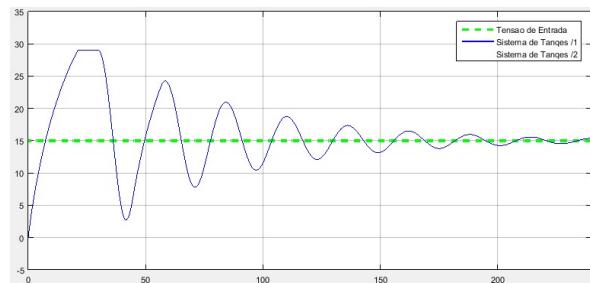
4.3.2 Controle proporcional e Integrativo - PI

Para este controlador foram testados os valores $K_P = 0.5, 1, 2$ e 5 e $K_I = 1, 0.1, 0.01$ e 0.01 , respectivamente. Os resultados podem ser vistos na Figura 25

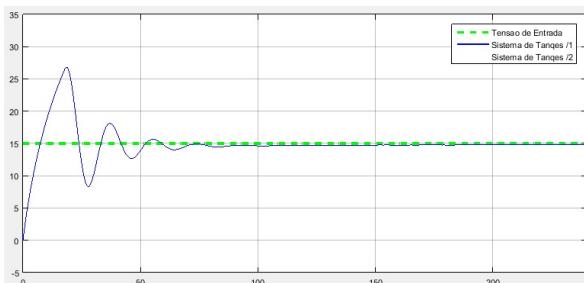
Figura 25: Resposta a uma entrada degrau de amplitude 15 - controlador **PI** de segunda ordem.



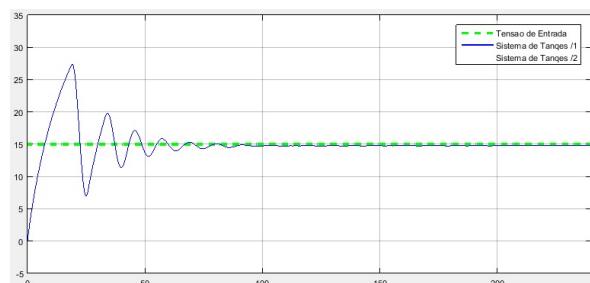
a) Controlador **PI** com $K_P = 0.5$ e $K_I = 1.0$



b) Controlador **PI** com $K_P = 1.0$ e $K_I = 0.1$



c) Controlador **PI** com $K_P = 2.0$ e $K_I = 0.01$



d) Controlador **PI** com $K_P = 5.0$ e $K_I = 0.01$

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

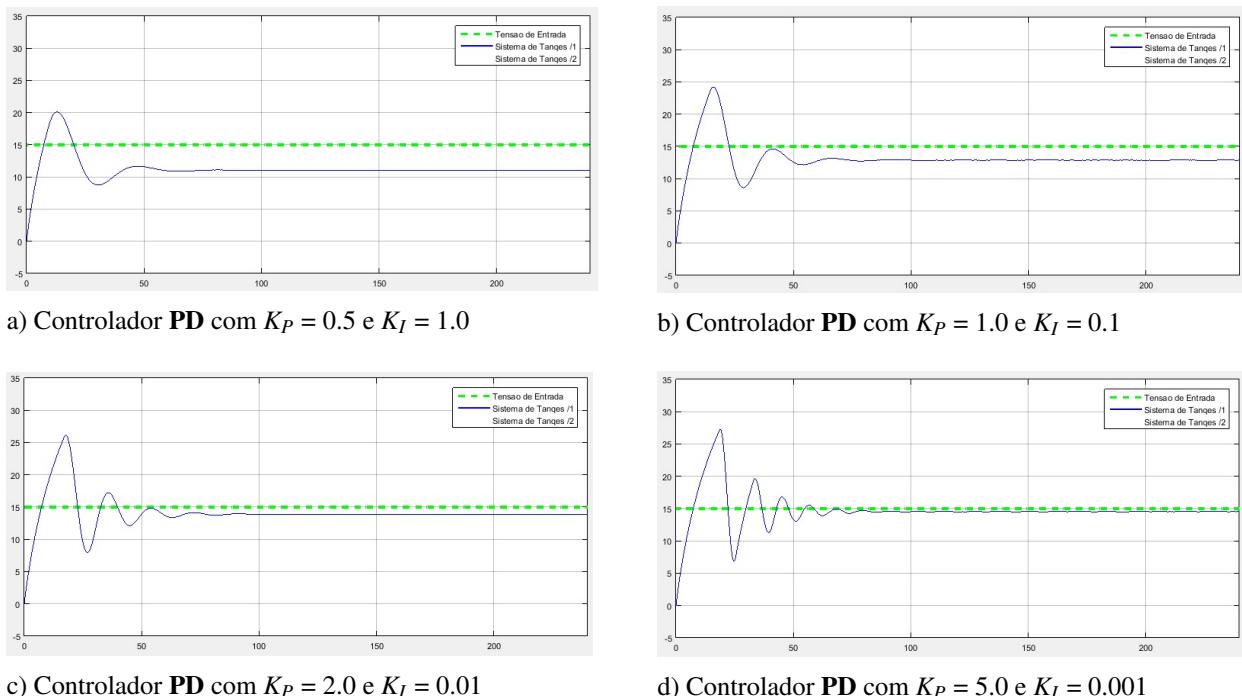
Observações:

Nota-se que aumentando-se o K_P e diminuindo-se o K_I ocorre uma melhora com relação ao regime permanente causado pelo controlador PI. Foi observado a mesma coisa com relação ao controlador de primeira ordem. É claro que aumentando-se o K_P em demasia, inicia-se uma degeneração do resultado.

4.3.3 Controle proporcional e Derivativo - PD

Para este controlador foram testados os valores $K_P = 0.5, 1, 2$ e 5 e $K_D = 1, 0.1, 0.01$ e 0.001 , respectivamente. Os resultados podem ser vistos na Figura 26

Figura 26: Resposta a uma entrada degrau de amplitude 15 - controlador PD de segunda ordem.



Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

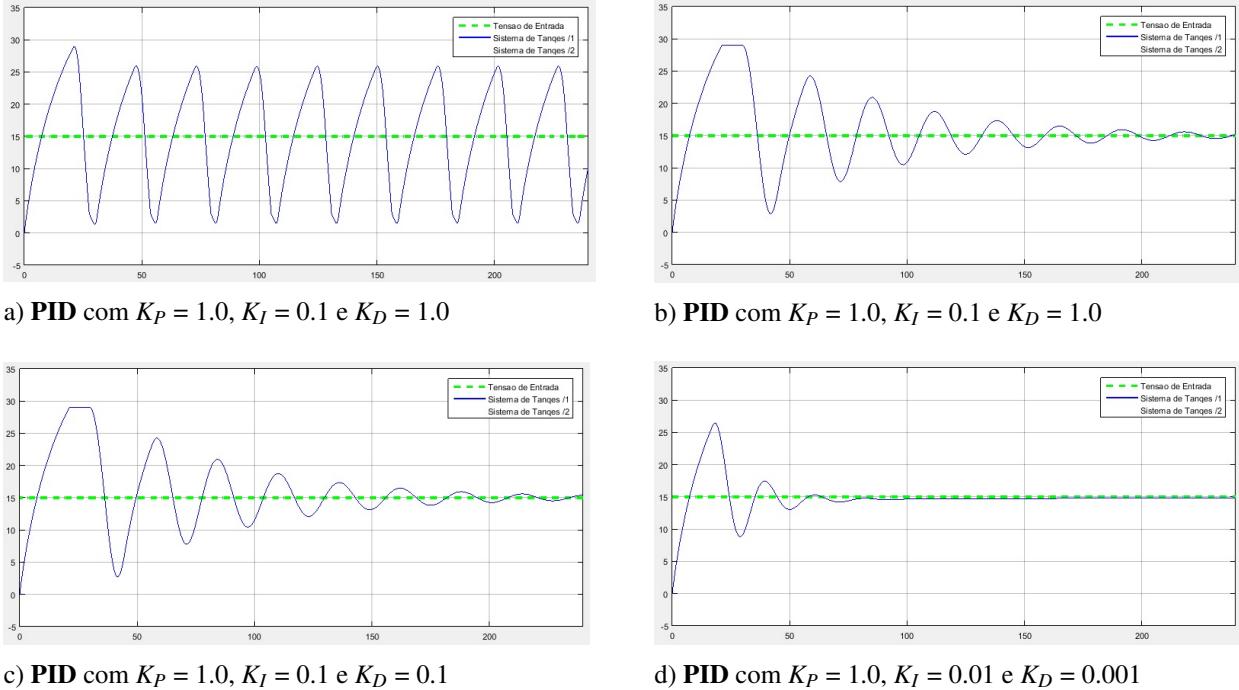
Observações:

A ação derivativa em conjunto com a ação proporcional, provê uma antecipação. isso faz com que a resposta transitória seja mais rápida. podemos observar tal fato através da figura 26, assim como os efeitos das alterações nesses valores.

4.3.4 Controle proporcional Integral e Derivativo - PID

Para este controlador foram testados as seguintes combinações para K_P, K_I e K_D . $K_P=1.0, K_I=1.0$ e $K_D=1.0$; $K_P=1.0, K_I=0.1$ e $K_D=1.0$; $K_P=1.0, K_I=0.1$ e $K_D=0.1$ e $K_P=1.5, K_I=0.01$ e $K_D=0.001$. Os resultados podem ser vistos na Figura 27

Figura 27: Resposta a uma entrada degrau de amplitude 15 - controlador **PID** de segunda ordem.



Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Observações:

Da mesma forma que aconteceu com os casos nos controladores de primeira ordem, aqui mostra-se também que o conjunto de técnicas combinadas melhora as respostas de regime permanente e transitório. Observando a Figura 27 nota-se que se pode utilizar um grupo de valores de forma a obter-se a melhor resposta do sistema.

4.4 Comparação entre os sistemas de primeira e segunda ordem

Em um controlador proporcional de primeira ordem, quanto maior o valor de K_P menor o erro de regime permanente, porém maior a ampliação dos sinais de ruído. Já para sistemas de segunda ordem o aumento de K_P também reduz o erro de regime permanente, porém o sistema passa a apresentar um maior *overshoot* e, além disso, o sistema passa a apresentar um maior período oscilatório antes de atingir o regime permanente.

Por outro lado, os controladores do tipo *PI* eliminaram o erro de regime permanente nos dois tipos de sistema (primeira e segunda ordem).

Observa-se ainda que os controladores do tipo *PD*, no caso dos de primeira ordem, uma diminuição no K_D implica em um menor ruído e por consequência, em uma melhor resposta. contudo, para os sistemas de segunda ordem, quanto maior o K_D , mais amortecido é a resposta do sistema.

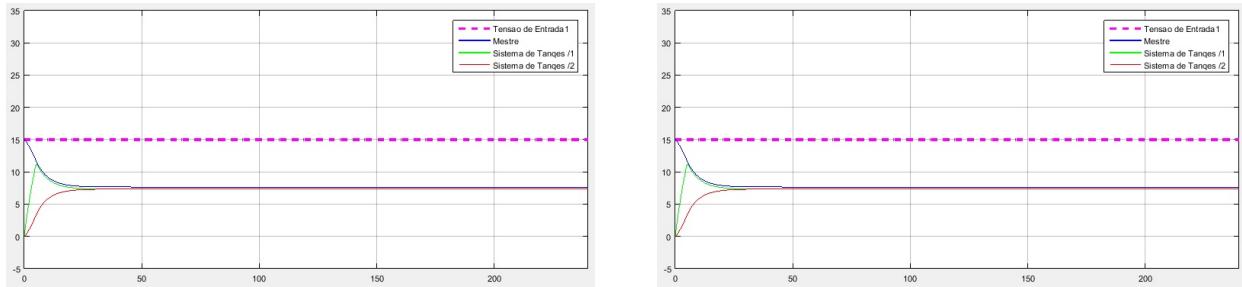
Considerando as três ações, em controladores do tipo *PID*, observa-se um comportamento de características semelhantes aos controladores do tipo *PI*, o que se observa é que, nesses casos, o tempo de estabilização menor, quando se considera a parcela derivativa.

4.5 Controle em cascata

4.5.1 Configuração P-Escravo

Em combinações P-escravo o controlador mestre dominará o comportamento do sistema, ou seja, sendo o mestre um controlador do tipo proporcional, independente da configuração do controlador escravo (P, PI, PD ou PID) e de seus ajustes, o controlador resultante terá características básicas de um controlador proporcional. As figuras seguintes ilustrarão essas afirmações mostrando que qualquer que seja a configuração do controlador escravo, a saída resultante dependerá do K_P do controlador mestre, que é o quem determina a referência para o controlador escravo.

Figura 28: Configuração em cascata P-P

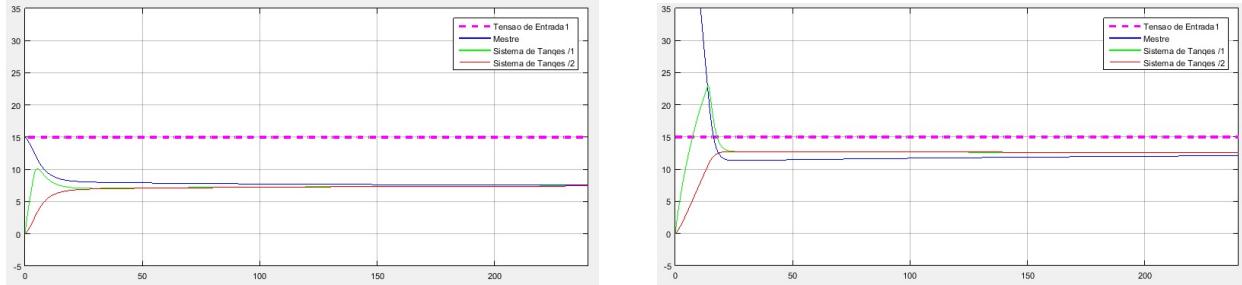


a) Configuração P – P - Ganhos: 1 e 5

b) Configuração P – P - Ganhos: 5 e 5

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Figura 29: Configuração em cascata P-PI



a) Configuração P – PI - Ganhos: 1, 1 e 0.01

b) Configuração P – PI - Ganhos: 5, 2 e 0.01

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

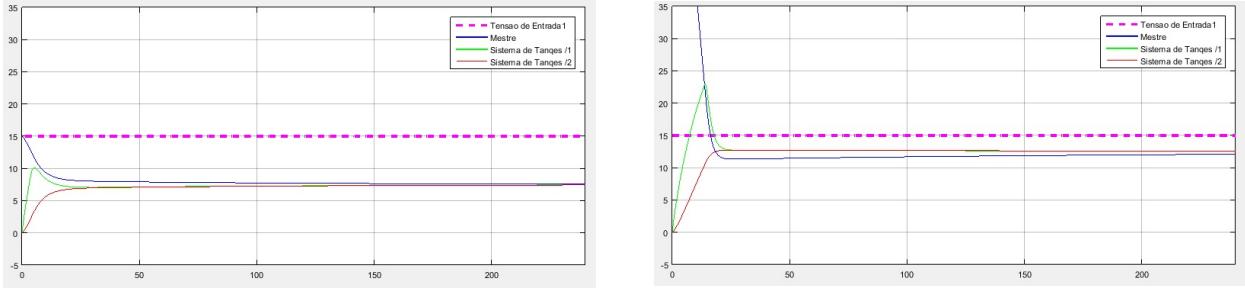
4.5.2 Configuração PI-P

Para esta combinação foi verificado que com o aumento do K_P escravo há uma diminuição do regime transitório, porém não há alteração no permanente. Esse fato pode ser melhorado com o aumento no ajuste K_P do mestre sem que este se torne próximo ou superior ao K_P do escravo, e a diminuição do K_I do mestre. Esse fato pode ser acompanhado através das Figuras 32 e 33.

4.5.3 Configuração PI-PI

Para esta configuração, pode-se observar o resultado das configurações e ajustes anteriores, de

Figura 30: Configuração em cascata P-PD

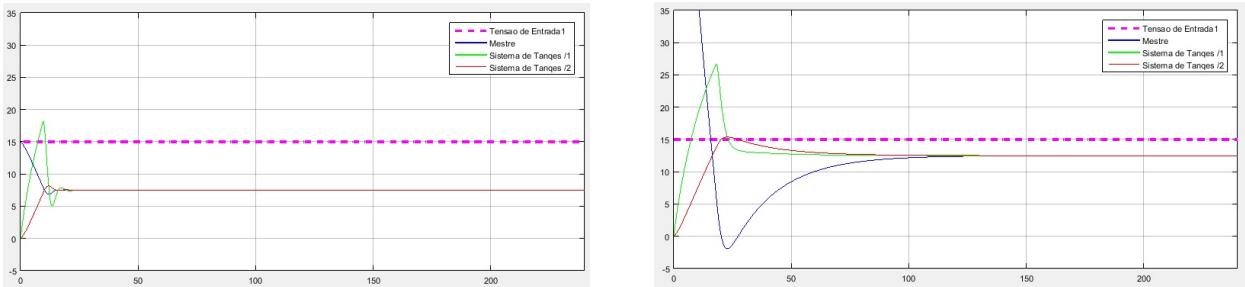


a) Configuração P – PD - Ganhos: 1, 1 e 0.01

b) Configuração P – PD - Ganhos: 5, 2 e 0.01

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Figura 31: Configuração em cascata P-PID

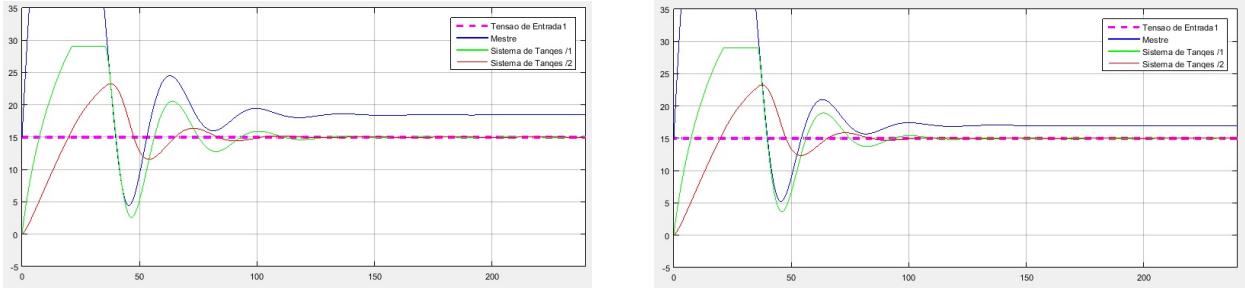


a) Configuração P – PID - Ganhos: 1, 1, 1 e 1

b) Configuração P – PID - Ganhos: 5, 2, 0.1 e 0.01

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Figura 32: Configuração em cascata PI-P



a) Configuração PI – P - Ganhos: 1, 0.5 e 1

b) Configuração PI – P - Ganhos: 5, 2, 0.1 e 0.01

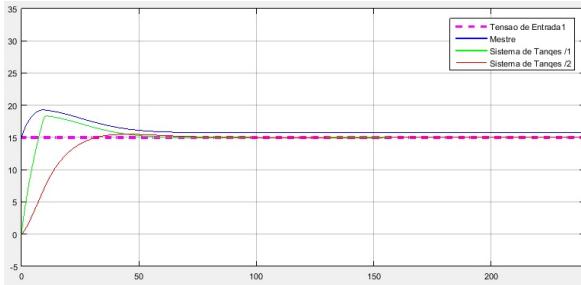
Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

forma que mantendo-se a melhor configuração obtida para o mestre e mantendo-se fixo os valores de K_P e K_I para o mesmo, podemos também manter fixo o valor de K_P do escravo de modo a alterar apenas o valor de K_I do escravo. Com isso, podemos obter os resultados apresentados na figura 34

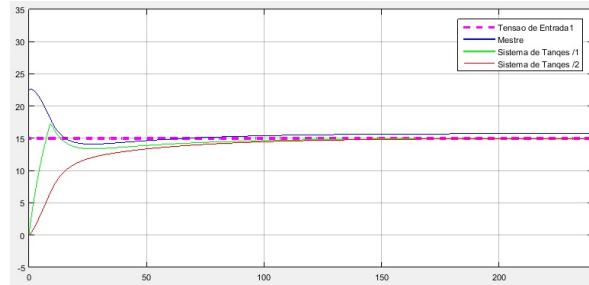
4.5.4 Configuração PI-PD

Utilizando o mesmo critério mostrado anteriormente, manteremos valores conhecidos para o K_P e o K_I do mestre, e de mesma forma o faremos com o K_P do escravo, restando apenas alterar o valor do K_D do escravo. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 35. Com isso é esperado

Figura 33: Configuração em cascata PI-P



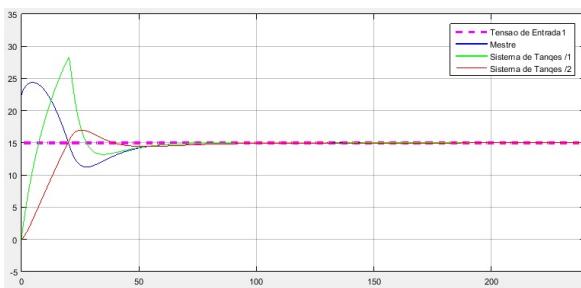
a) Configuração PI – P - Ganhos: 1, 0.1 e 3



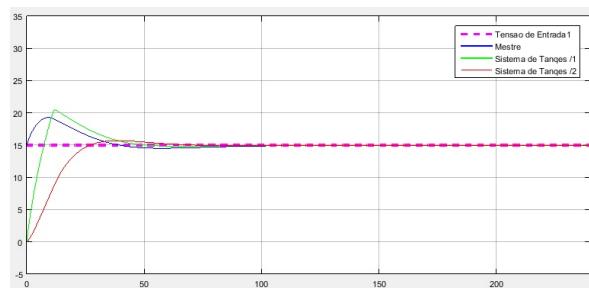
b) Configuração PI – P - Ganhos: 1.5, 0.05 e 3

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

Figura 34: Configuração em cascata PI-PI



a) Configuração PI – PI - Ganhos: 1.5, 0.1, 3 e 0.5

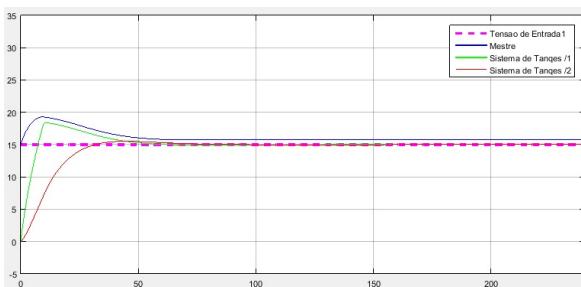


b) Configuração PI – PI - Ganhos: 1, 0.1, 3 e 0.1

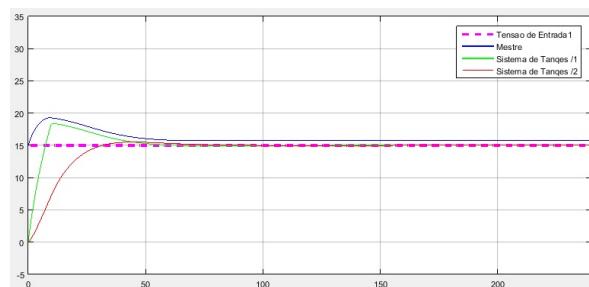
Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

observar que a alteração no escravo não irá interferir na resposta do sistema, pois como se sabe, esse resultado é dominado pelo mestre.

Figura 35: Configuração em cascata PI-PD



a) Configuração PI – PD - Ganhos: 1.0, 0.1, 3 e 1.0



b) Configuração PI – PD - Ganhos: 1, 0.1, 3 e 0.1

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

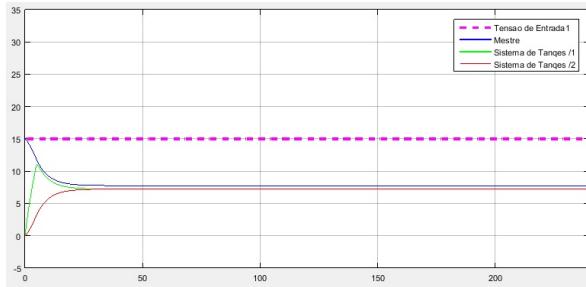
4.5.5 Configuração PI-PID

Esta configuração consiste em uma combinação que já foi previamente explicada e tende, conforme já falado, a ser dominado pelo mestre de forma a possuir comportamento semelhante ao controlador do tipo PI – PI, portanto não carece de maiores esclarecimentos.

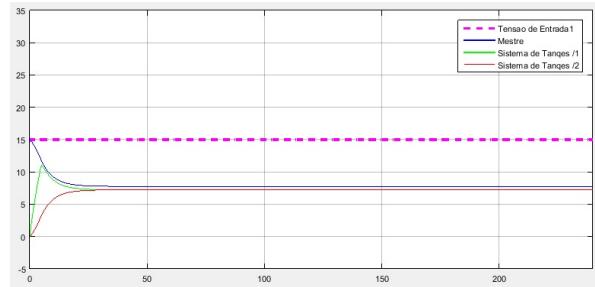
4.5.6 Configuração PD-P

Essa configuração possui comportamento semelhante ao comportamento do controlador P-escravo, onde o K_P do mestre é dominante e consegue melhorar a saída de regime permanente a medida que seu valor é aumentado, além disso, como se pode observar na Figura 36, os valores de K_D do mestre e de K_P do escravo possuem pequena ou nenhuma influência na saída do sistema.

Figura 36: Configuração em cascata PD-P



a) Configuração PD – P - Ganhos: 1.0, 1.0 e 3.0



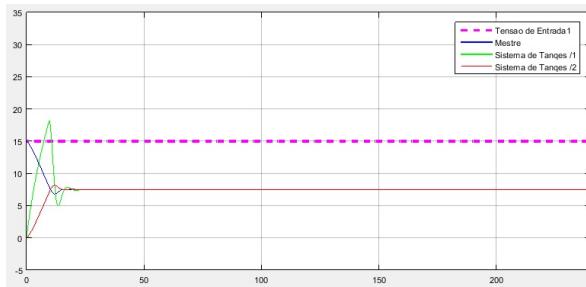
b) Configuração PD – P - Ganhos: 1.0, 5.0 e 3.0

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

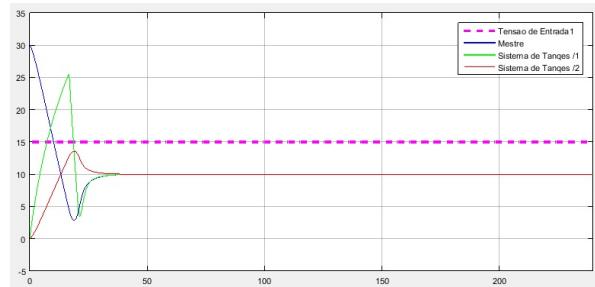
4.5.7 Configuração PD-PI

Conforme já esperado, alterações no K_P do mestre melhorará o regime permanente, alterações no K_D do mestre não provocarão alterações na saída do sistema, alterações no K_P do escravo diminuirão o overshoot e alterações no K_I do escravo diminuirão as oscilações, conforme Figura 36

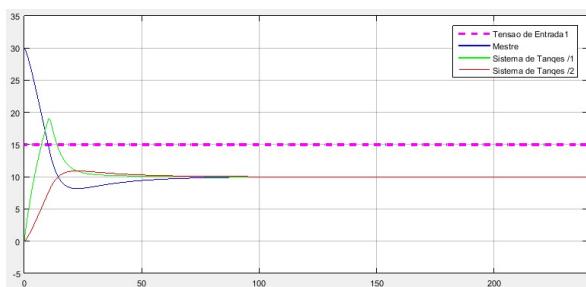
Figura 37: Configuração em cascata PD-PI



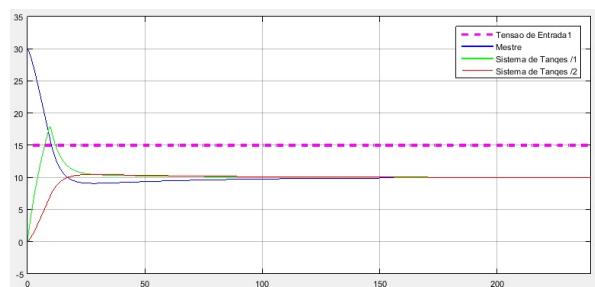
a) Configuração PD – PI - Ganhos: 1.0, 1.0, 1.0 e 1.0



b) Configuração PD – PI - Ganhos: 2.0, 1.0, 2.0 e 1.0



c) Configuração PD – PI - Ganhos: 2.0, 1.0, 2.0 e 0.1



d) Configuração PD – PI - Ganhos: 2.0, 1.0, 5.0 e 0.1

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

4.5.8 Configuração PD-PD

Esta configuração mostra resultados bastante semelhante a configuração **P – P**, de forma que a maior influência na saída é dada pelo K_P do mestre, não acrescentando novidades ao que já se conhece.

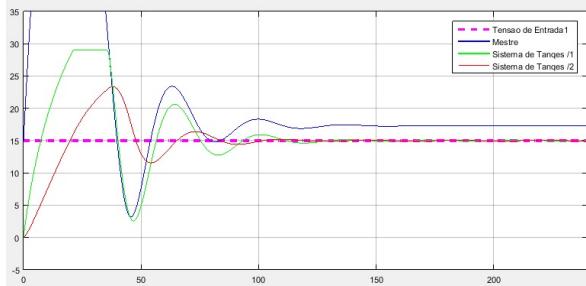
4.5.9 Configuração PD-PID

Esta configuração também não nos traz novas observações, pois o comportamento do sistema será bastante semelhante, para não dizer igual, ao comportamento da configuração **PD – PI**, ou mesmo **P – PI**, uma vez que já vimos que a ação derivativa no mestre não produz influências na saída do sistema.

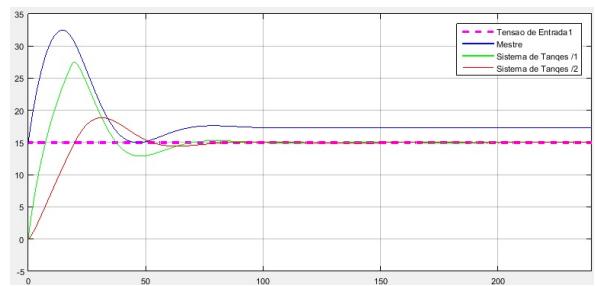
4.5.10 Configuração PID-P

O comportamento desse sistema também será semelhante ao de um sistema já visto. Trata-se da configuração **PI – P** e, como já sabemos, aumentando-se o K_P do mestre, melhora-se o regime permanente, o K_I do mestre, quando escolhido bons valores, pode eliminar o *overshoot*, conforme pode ser observado na Figura 38

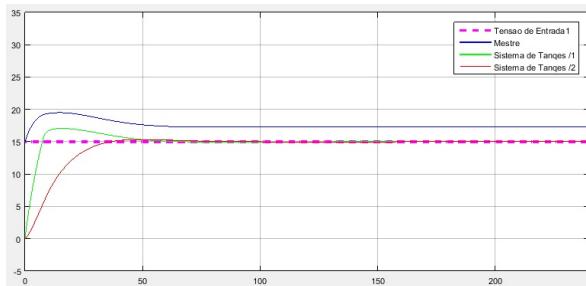
Figura 38: Configuração em cascata PID-P



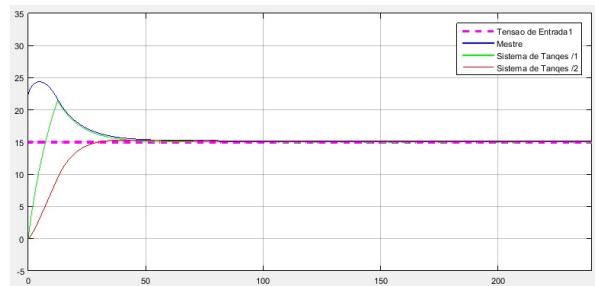
a) Configuração **PID – P** - Ganhos: 1.0, 0.5, 0.5 e 1.0



b) Configuração **PID – P** - Ganhos: 1.0, 0.2, 0.1 e 1.0



c) Configuração **PID – P** - Ganhos: 1.0, 0.1, 0.1 e 1.0



d) Configuração **PID – P** - Ganhos: 1.5, 0.1, 0.01 e 10

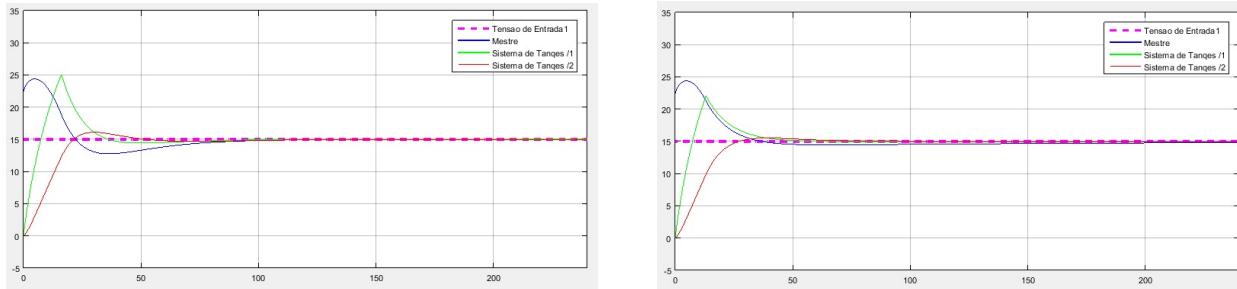
Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB®

4.5.11 Configuração PID-PI

Para esta configuração, como já foi analisado antes, será mantida a melhor configuração **PID** do mestre de forma a ser alterado apenas os parâmetros do escravo. Assim, pode-se observar alterações

no K_P e no K_I do escravo, de forma a obter-se a melhor performance. Podemos comparar esse controlador com outro já visto, o **PI – PI** e seus resultados poderão ser observados na Figura 39.

Figura 39: Configuração em cascata PID-PI



a) **PID – PI** - Ganhos: 1.5, 0.1, 0.01, 10.0 e 0.5

b) **PID – PI** - Ganhos: 1.5, 0.1, 0.01, 15.0 e 0.1

Fonte: Elaborada pelos autores através do software MATLAB[®]

4.5.12 Configuração PID-PD

Esta configuração segue o mesmo princípio dos controladores **PID – P**, uma vez que o ganho K_D do escravo não influenciará na saída, além disso, essa configuração descrita já foi vista anteriormente.

4.5.13 Configuração PID-PID

Da forma similar as configurações vistas no item anterior, a saída do sistema será determinada pelos ganhos K_P , K_I e K_D do mestre e K_P e K_I do escravo. Com isso, esse controlador possui resposta similar ao controlador **PID – PI**, ou seja, não sofre alterações na saída por conta da ação derivativa K_D do escravo.

4.6 Comparação entre os controladores de primeira e segunda ordem

A maior diferença entre os controladores de primeira e segunda ordem consiste primeiro na quantidade de malhas: uma para os controladores de primeira ordem e duas para os controladores de segunda ordem. Em segundo lugar está a quantidade de parâmetros a serem ajustados, pois os sistemas de segunda ordem possuem uma maior quantidade de parâmetros quando são comparados aos controladores de primeira ordem. Considerando esses aspectos, os controladores de primeira ordem, por serem de configuração mais simples, podem se sobressair quando comparados aos de segunda ordem.

Contudo, ao utilizar-se de um controlador do tipo **PI** como mestre, o controle do sistema pode apresentar-se bastante simples, com a necessidade de poucos ou mesmo nenhum ajuste por parte do controlador escravo. Considerando ainda que o controlador mestre seja do tipo **PID**, o ajuste na malha escrava se torna mais simples ainda.

5 CONCLUSÃO

Durante a produção deste relatório ficou evidente os efeitos dos controladores dos tipos **P**, **PI**, **PD** e **PID** na saída de um sistema tanto de primeira quanto de segunda ordem. Além disso, foi observado o comportamento apresentado por um sistema quando se altera cada parcela dos ganhos em cada controlador, seja de primeira ou segunda ordem.

Foi observado também a forma de se alterar os valores dos ganhos, pois cada alteração provoca um efeito diferente, dependendo de qual parcela se está alterando. De uma forma geral, a parcela proporcional de um controlador acelera a resposta do sistema, já a parcela integrativa melhora, diminuindo, o erro de regime permanente, inserindo um polo na origem ou próximo a ela, e a parcela derivativa melhora a resposta transitória, adicionando um zero.

O controlador do tipo **PID** consiste na combinação de todas essas parcelas, de forma a obter a melhor performance para a resposta de um sistema, contudo, essa performance pode ser ainda melhorada quando se utiliza controladores de segunda ordem.

Referências

MEDEIROS, A. A. D.; MAITELLI, A. L. Modelagem e Análise de Sistemas Dinâmicos. UFRN. Material didático. [S.l.], fev. 2010.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno, 5^a ed.** [S.l.]: São Paulo: Pearson, 2011.