

SISTEMA PARA CONTROLE DE POSICIONAMENTO DO ELEVADOR

SYSTEM FOR CONTROL OF A ELEVATOR POSITION

Flávia Gonçalves Fernandes, Marcos Napoleão Rabelo

RESUMO

Dentre as muitas atribuições de um engenheiro, o controle de sistemas é uma tarefa primordial para o sucesso de um negócio. Esse gerenciamento é fundamental para garantir o controle da produção, reduzir custos, evitar prejuízos e visar lucros. No entanto, gerenciar sistemas de controle é um desafio que pode consumir muito tempo do gestor, inviabilizando outras ações de extrema importância para a produtividade e o crescimento da empresa. Para facilitar esse trabalho, o mercado tem desenvolvido e aperfeiçoado softwares que possibilitam esse controle de forma mais simples e funcional. Nessa perspectiva, esse trabalho tem como objetivo utilizar fundamentos de sistemas de controle para ajustar a posição de um elevador, para que ele consiga atingir a altura desejada com o menor erro possível. Para isso, também foram inseridos controladores com ações independentes no sistema: do tipo proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) e proporcional-integral-derivativo (PID), apresentando os resultados obtidos a partir do desempenho do sistema para cada um dos casos, com suas respectivas discussões e conclusões.

Palavras-chave: Desempenho, Função de Transferência, Sistema de Controle.

ABSTRACT

Among the many assignments of an engineer, systems control is a prime task for the success of a business. This management is essential to ensure production control, reduce costs, avoid losses and target profits. However, managing control systems is a challenge that can be time-consuming for the manager, making other actions of extreme importance for productivity and company growth unfeasible. To facilitate this work, the market has developed and perfected software that enables this control in a simpler and more functional way. In this perspective, this work aims to use fundamentals of control systems to adjust the position of an elevator, so that it can achieve the desired height with the smallest possible error. For this, we also inserted controllers with independent actions in the system: proportional (P), proportional-integral (PI), proportional-derivative (PD) and proportional-integral-derivative (PID), presenting the results

obtained from performance of the system for each case, with their respective discussions and conclusions.

Keywords: Performance, Transfer Function, Control System.

INTRODUÇÃO

Um sistema de controle é uma interconexão de vários componentes resultando numa configuração que fornece um desempenho desejado [1]. A descrição do sistema se refere à relação causal entre a entrada e a saída do sistema, em geral, descrita matematicamente através de equações diferenciais, equações de diferença, funções de transferência [2]. Assim, o sinal de entrada deve ser controlado tal que o sinal de saída possua um comportamento desejado [3].

Em indústrias que possuem sistemas de controle, muitos fatores podem contribuir para não ser possível se alcançar os objetivos de desempenho: a complexidade do controlador se refere a topologia da estrutura de controle e ao grau dos polinômios utilizados para implementar o controlador; a utilização de estruturas de controle com complexidade polinomial predefinida [4].

Além disso, usualmente, sistemas de controle sofrem a ação de distúrbios, tais como atrito e folgas, por exemplo. Tais distúrbios podem ser representados como sinais de entrada no sistema que afetam diretamente a planta a ser controlada [2].

Um sistema de controle em malha aberta utiliza um dispositivo atuador para controlar o processo diretamente sem a utilização de realimentação (feedback). Dessa forma, o sistema de controle não sabe qual o valor do sinal de saída (variável controlada). Porém, em malha fechada, a interação entre a entrada e a saída permite realocar os polos e zeros do sistema de tal forma a tentar satisfazer os requisitos desejados [5].

A ideia fundamental do projeto de sistemas de controle é alterar as características do sistema no domínio do tempo e, conseqüentemente, no domínio da frequência através da introdução de um controlador [6].

Os modelos de planta utilizados para o projeto de sistemas de controle são apenas aproximações da planta real [7]. Os modelos utilizados são em geral os mais

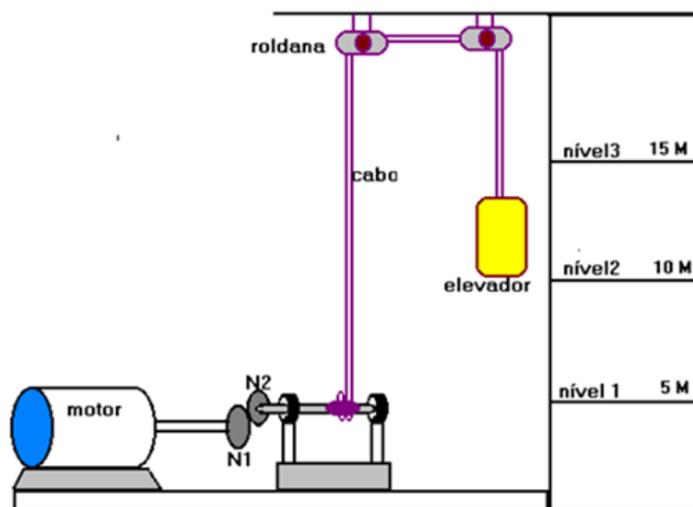
simples possíveis, optando-se com frequência por modelos lineares invariantes no tempo representados por funções de transferência com polinômios de baixa ordem [3]. Para isso, despreza-se comportamentos não lineares e parâmetros variantes no tempo quando estes não são significativos [8].

Neste contexto, o objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um sistema de controle para a posição de um elevador para que ele consiga atingir a altura desejada com o menor erro possível. Para isso, serão utilizadas várias técnicas matemáticas como: lugar das raízes, análise de sistema de controle de primeiro e segundo grau, entre outras. Além disso, inseriu-se um controlador com ações independentes no sistema, do tipo proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) e proporcional-integral-derivativo (PID), apresentando o desempenho do sistema para cada um dos casos e as conclusões.

SISTEMA DE CONTROLE DE POSIÇÃO DE ELEVADOR

O trabalho consiste em elaborar um sistema de controle para a posição de um elevador. A Figura 1 abaixo apresenta o esquema de funcionamento do mesmo.

Figura 1: Modelo do sistema de controle para a posição de um elevador.

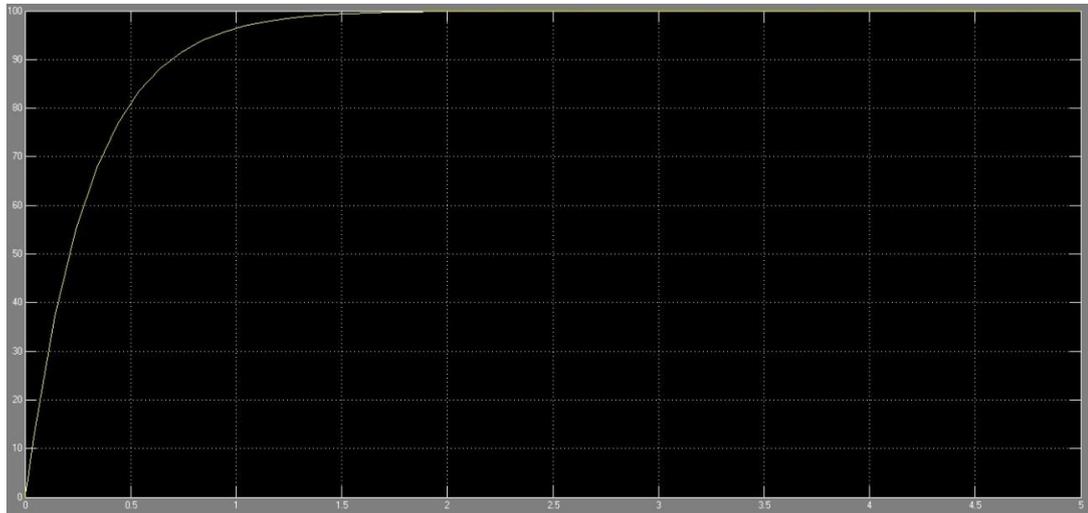


Fonte: Autoria própria (2019).

O sistema consiste de um motor elétrico, um par de roldanas e o cabeamento com o elevador. Experimentalmente obteve-se um modelo de resposta para a

velocidade do motor em malha aberta com uma entrada de corrente contínua de 100 volts. Obteve-se a seguinte variação de velocidade na Figura 2.

Figura 2: Variação da velocidade do sistema.



Fonte: Autoria própria (2019).

DESCRIÇÃO DA PLANTA

Função De Transferência Da Planta

Todo sistema de primeira ordem pode ser expressado por uma equação diferencial que quando submetida à transformada de Laplace resulta em um polinômio.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}$$

Onde $C(s)$ é a saída do sistema, $R(s)$ é a entrada, k é o ganho e τ é a constante de tempo do sistema.

$$K = \text{Ganho} = \frac{\text{saída}}{\text{entrada}} = \frac{100}{100} = 1$$
$$0,632 \times \text{Saída} = 0,632 \times 100 = 63,2$$

No gráfico, corresponde a $\tau = 0,3$

O modelo pode ser representado no diagrama de blocos do software Simulink, conforme Figura 3.

Figura 3: Modelo representado por meio de diagrama de blocos.



Fonte: Autoria própria (2019).

Aplicando um sinal degrau na entrada de 100 volts o sistema responderá de acordo com a figura apresentada no final da introdução.

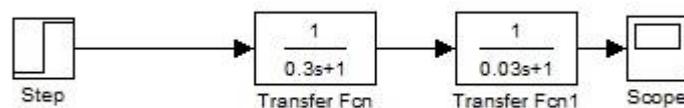
Sabendo da forma de funcionamento do sistema de primeira ordem notamos que ele parte de um valor e não alcança o valor final imediatamente, passando por um período onde sua saída é intermediária do ponto inicial e do ponto final, durante esse tempo dizemos que o sistema se encontra em regime transitório. Quando alcança o valor final e a partir daquele ponto o sistema encontra-se em regime permanente. Ou seja, o erro torna-se zero a partir daquele ponto.

Para o mesmo problema, também foi utilizado um sistema de segunda ordem que pode ser representado da seguinte maneira:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$

Para realizar o experimento com um sistema de segunda ordem, utiliza-se de uma nova função transferência de primeiro grau em série com a primeira. Está com zero de proporção dez vezes menor que o utilizado no esquema de primeira ordem, de acordo com a Figura 4.

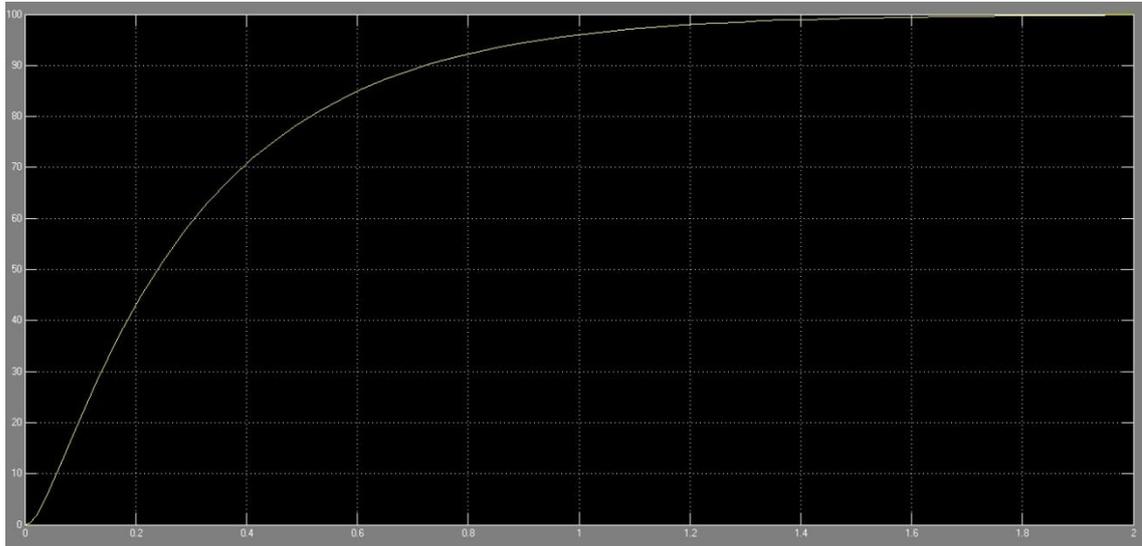
Figura 4: Modelo do sistema de controle para a posição de um elevador.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para o mesmo degrau de 100 volts aplicado na primeira simulação, temos a resposta apresentada na Figura 5.

Figura 5: Resposta ao degrau.

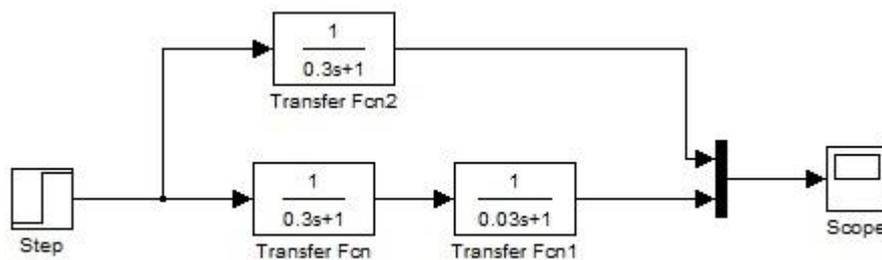


Fonte: Autoria própria (2019).

Pode-se notar que a elevação não é mais uma simples curva, que em um ponto dela, logo no início existe um ponto de flexão, o que mostra que o sistema possui dois zeros para controle.

Para comparar os dois sistemas, utilizou-se o diagrama de blocos exibido na Figura 6.

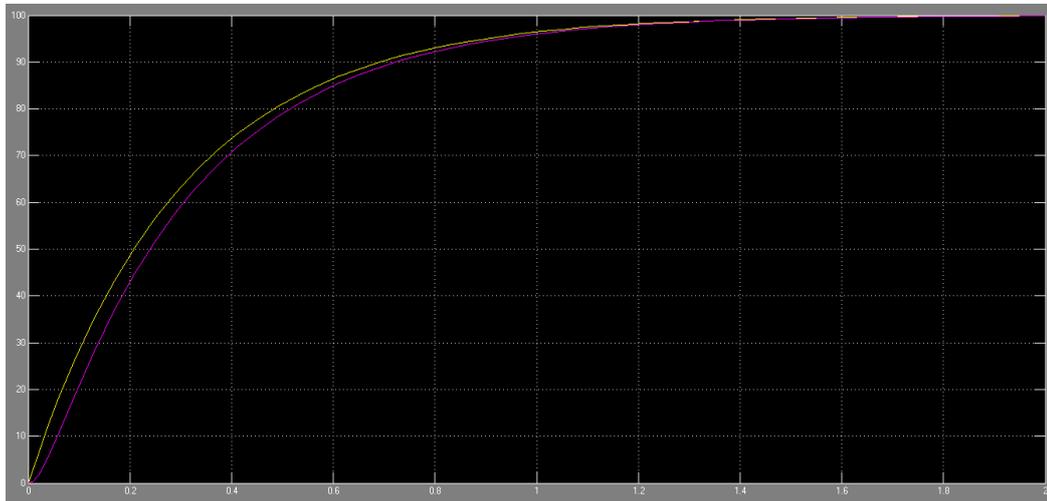
Figura 6: Diagrama de blocos para comparação dos dois sistemas: 1ª e 2ª ordem.



Fonte: Autoria própria (2019).

O gráfico obtido é apresentado na Figura 7. A linha amarela corresponde a um sistema de primeira ordem, enquanto a linha roxa representa o de segunda ordem.

Figura 7: Comparação do sistema de 1ª e de 2ª ordem.



Fonte: Autoria própria (2019).

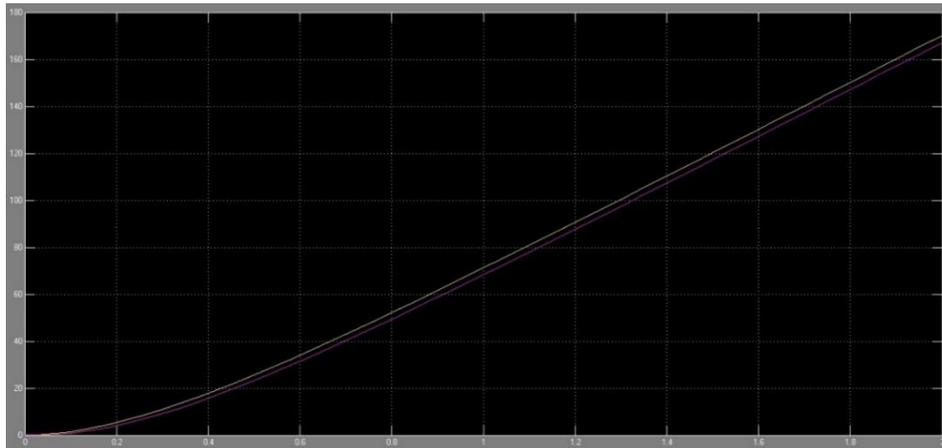
A partir dos resultados, pode-se notar que o sistema de segunda ordem apresenta um tempo de acomodação levemente maior que o de primeira. Esta pequena diferença foi obtida, pois, para simulação do sistema de ordem dois, ocorreu uma situação na qual um dos zeros é dez vezes menor que o outro.

No sistema de segunda ordem, pode-se ver que o tempo de acomodação varia de acordo com o fator de amortecimento de forma que são diretamente proporcionais.

De acordo com os modelos de posicionamento do elevador como saída, apresentados anteriormente, e observando os seus respectivos gráficos, pode-se concluir que não é possível controlar a posição utilizando um sistema em malha aberta, pois o sistema não conseguiu atingir o valor desejado.

Todos os gráficos até agora apresentados são referentes a velocidade de movimentação do elevador, porém, queremos controlar sua posição. De acordo com conhecimentos matemáticos, sabe-se que se pode encontrar a posição através da integração da função de velocidade. A Figura 8 apresenta o gráfico de simulação de posição do elevador em malha aberta.

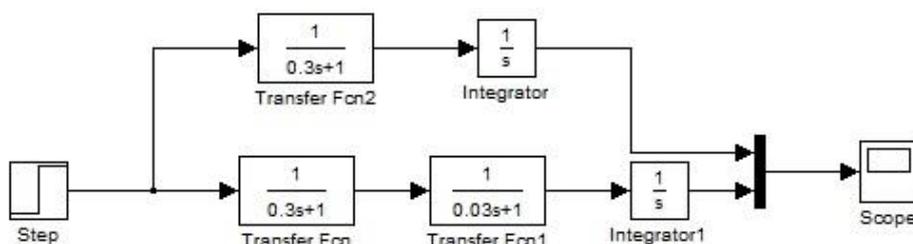
Figura 8: Simulação da posição do elevador em malha aberta.



Fonte: Autoria própria (2019).

O gráfico da Figura 8 foi gerado através do diagrama mostrado na Figura 9.

Figura 9: Diagrama de blocos da simulação em malha aberta.



Fonte: Autoria própria (2019).

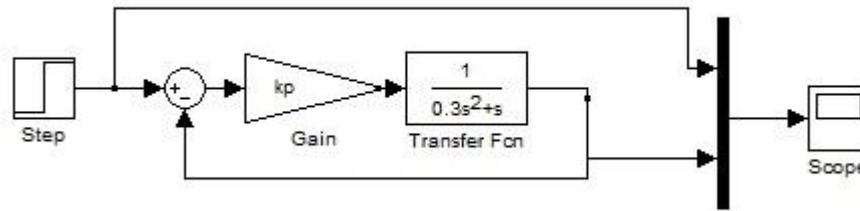
A partir do gráfico da Figura 9, vê-se que a posição tende ao infinito com um controle em malha aberta, ou seja, é impossível realizar o controle a posição em malha aberta, para isso faz-se o uso de feedback (realimentação) e controladores.

SIMULAÇÃO CONTROLE EM MALHA FECHADA

Controlador Proporcional

Para simulação do sistema sob ação de um controlador de ganho proporcional utilizou-se o diagrama da Figura 10, onde a função de transferência é a posição do elevador para uma entrada de degrau de 100 volts.

Figura 10: Simulação do sistema com controlador proporcional.



Fonte: Autoria própria (2019).

A função de transferência para o modelo com controlador proporcional da Figura 10 é:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{Kp}{0.3s^2 + s}}{1 + \frac{Kp}{0.3s^2 + s}} = \frac{\frac{Kp}{0.3s^2 + s}}{\frac{0.3s^2 + s + Kp}{0.3s^2 + s}} = \frac{Kp}{0.3s^2 + s + Kp}$$

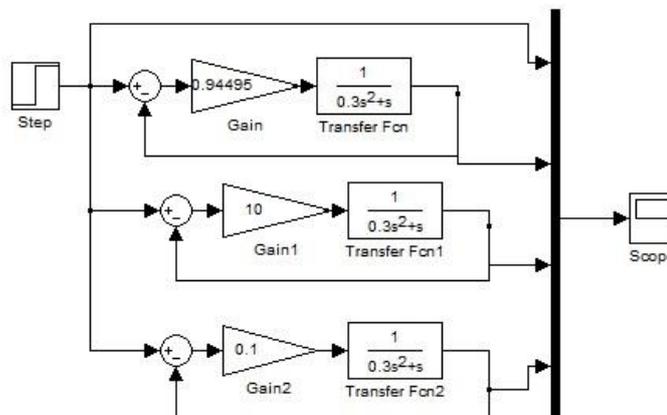
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{Kp}{0.3s^2 + s + Kp}$$

Desse modo, verifica-se que:

- O sistema é criticamente amortecido para $Kp = 0,944$;
- O sistema é subamortecido para $Kp > 0,944$;
- E o sistema é sobreamortecido para $Kp < 0,944$.

Na Figura 11, têm-se a simulação em diagrama de blocos do sistema de controle de malha fechada, para três valores de Kp , de modo que ele seja classificado em cada um dos tipos de sistemas acima citados.

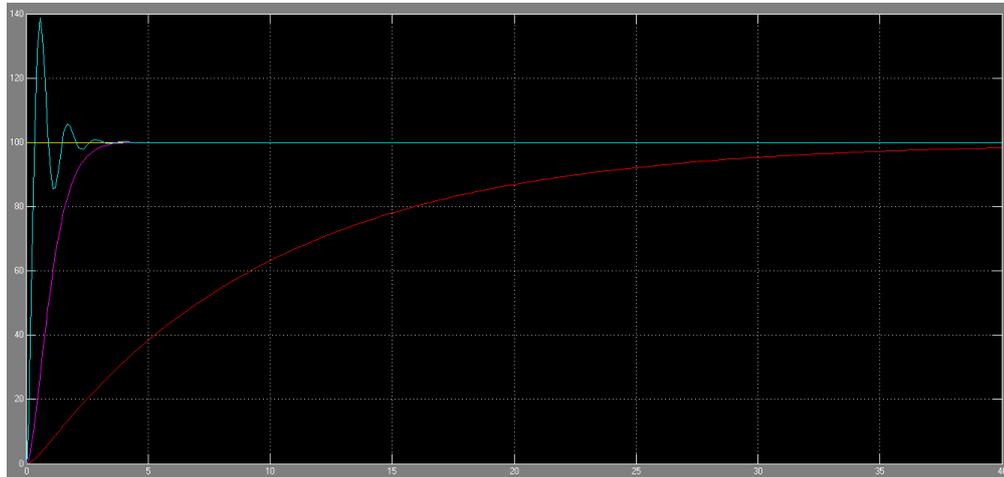
Figura 11: Diagrama de blocos do sistema com controlador proporcional para três valores de Kp .



Fonte: Autoria própria (2019).

O gráfico da Figura 12 apresenta resultado sobreamortecido, subamortecido e criticamente amortecido, nessa ordem, a partir dos valores de K_p apresentados na Figura 11.

Figura 12: Resultado da simulação para três valores de K_p .



Fonte: Autoria própria (2019).

Dessa forma:

A curva azul representa um sistema sobreamortecido ($\zeta > 1$) com $K_p = 10$. Ou seja, sua função de transferência é:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{10}{0.3s^2 + s + 10}$$

A curva roxa representa um sistema criticamente amortecido ($\zeta = 1$) com $K_p = 1$. Logo, sua função de transferência é:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{0.3s^2 + s + 1}$$

A curva amarela representa um sistema subamortecido ($0 < \zeta < 1$) com $K_p = 10$. Logo, sua função de transferência é:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0.1}{0.3s^2 + s + 0.1}$$

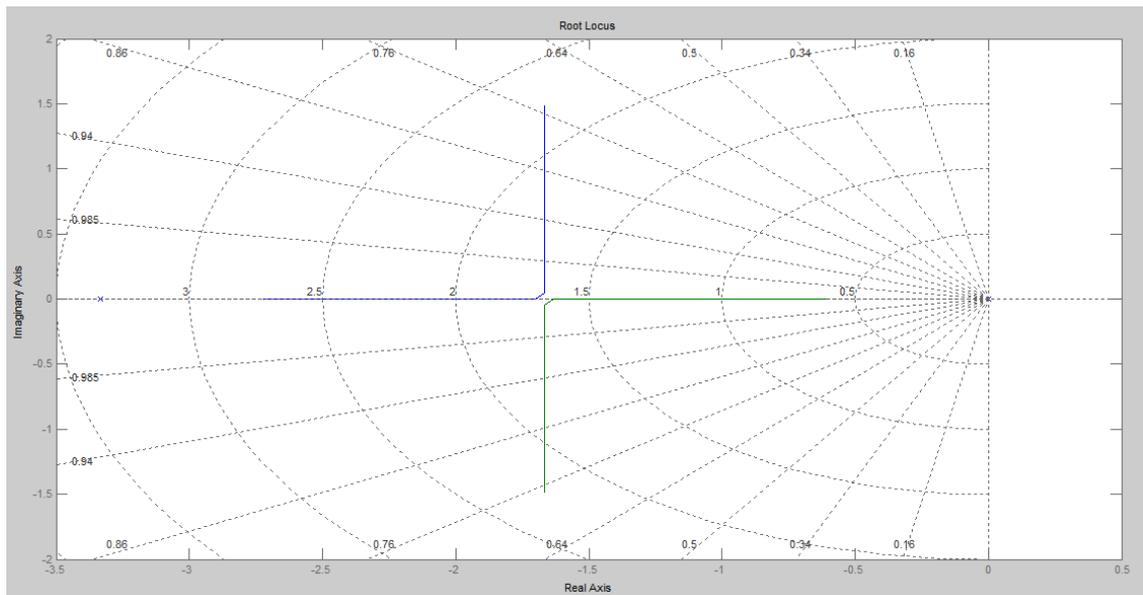
A curva azul representa a entrada do sistema com amplitude 100.

O Método do Lugar das Raízes (M.L.R.) é uma técnica gráfica que permite visualizar de que forma os polos de um sistema em malha fechada variam quando se

altera o valor de um parâmetro específico, que geralmente corresponde ao ganho (OGATA, 2011).

Utilizando a ferramenta MATLAB para gerar o gráfico do lugar das raízes para o controlador proporcional, obtém-se a Figura 13.

Figura 13: Método do lugar das raízes utilizando o controlador proporcional.



Fonte: Autoria própria (2019).

Nota-se que uma pequena brecha no centro do gráfico foi gerada devido à uma resolução que não foi o suficiente para expressar todos os pontos.

O valor de K_p é diretamente ligado ao fator de amortecimento, o que define o tipo de saída. Desse modo, o controlador possui total controle sobre o tipo de resposta e também do seu tempo de amortecimento.

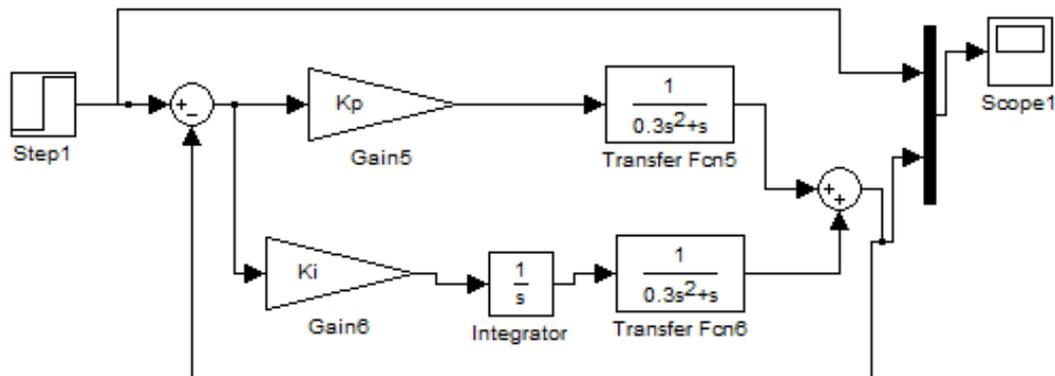
A saída sempre apresentará um pequeno erro de offset mesmo que mínimo, esse erro pode ser até desprezível dependendo da aplicação do sistema. O controlador é um dos mais simples possíveis, ou seja, de baixo custo e suscetível a erros devido a atuações externas. Mesmo assim, pode apresentar um resultado aceitável, o que varia de planta a planta. Para atuar com ganhos muito grandes, ele se apresenta de forma muito instável, fazendo que o sistema tenha uma resposta muito rápida, porém com um valor de overshoot muito acima do esperado.

Na teoria de controle, o overshoot refere-se à uma saída que excede seu valor final de estado estacionário. Para uma entrada por degrau, o percentual do overshoot (PO) é o valor máximo menos o valor do degrau dividido pelo valor do degrau (OGATA, 2011).

Controlador Proporcional-Integral

A Figura 14 mostra o diagrama de blocos em função de K_p e K_i , que corresponde ao controlador proporcional-integral.

Figura 14: Sistema com controlador proporcional-integral.



Fonte: Autoria própria (2019).

A função de transferência para o modelo com controlador proporcional-integral da Figura 14 é:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{0,5K_p s + 0,5K_i}{1 + \frac{0,5K_p s + 0,5K_i}{0,25s^3 + s^2}} = \frac{0,5K_p s + 0,5K_i}{0,25s^3 + s^2 + 0,5K_p s + 0,5K_i}$$

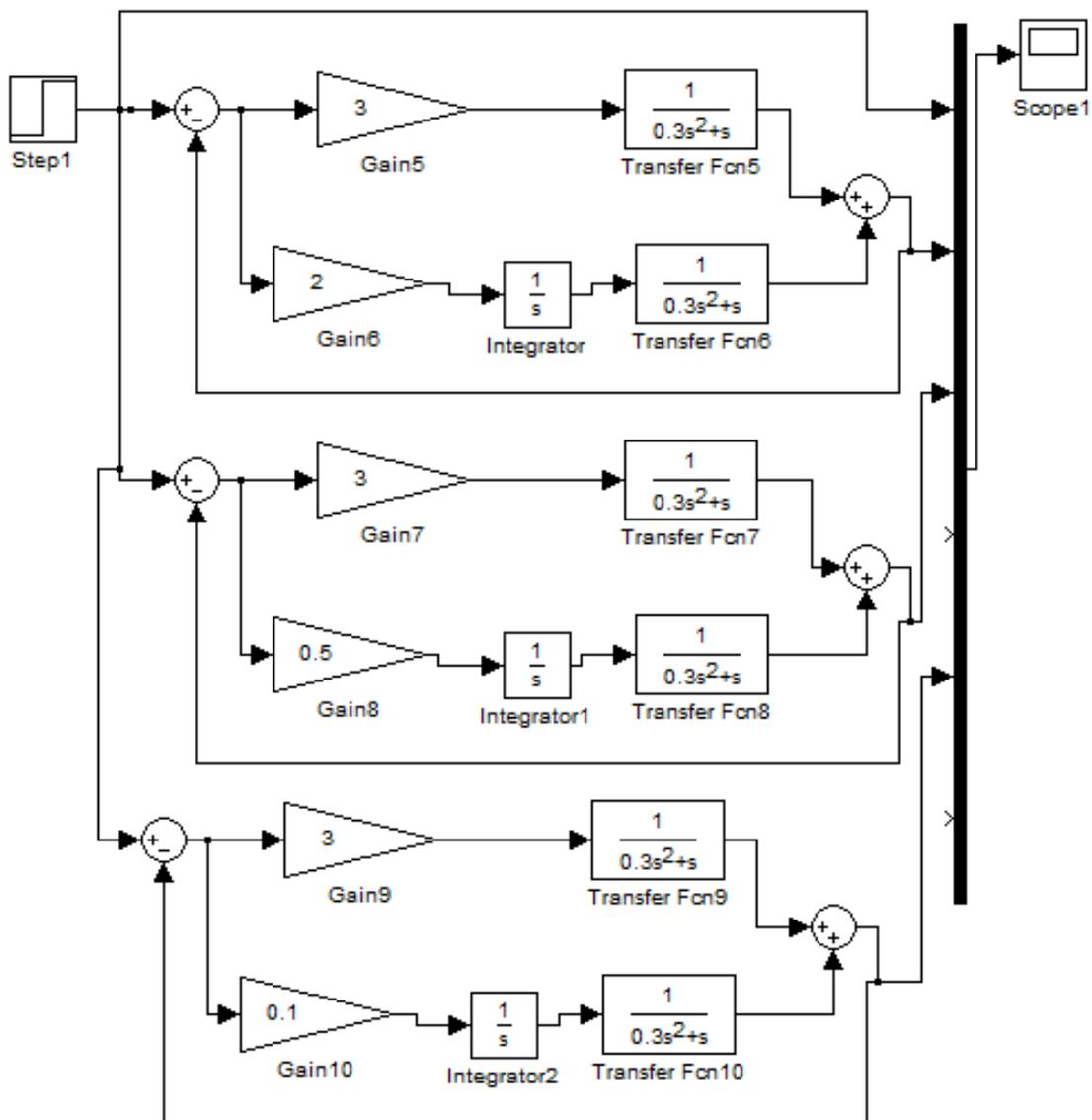
A equação característica do sistema é:

$$EC: 0,3s^2 + s + K_d s + K_p = 0$$

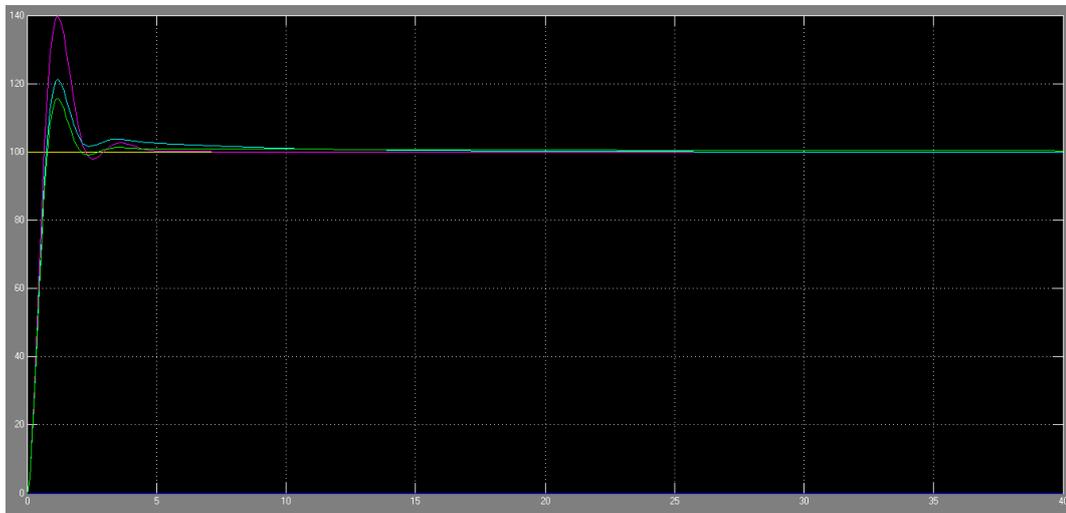
$$\text{Ganho} = 1$$

A Figura 15 mostra a simulação em diagrama de blocos do sistema de controle de malha fechada, para três valores de K_p e de K_i . Em seguida, apresenta-se o gráfico apresentado pela Figura 16.

Figura 15: Diagrama de blocos do sistema com controlador proporcional-integral para três valores de K_i .



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 16: Resultado da simulação para os três valores de K_i .

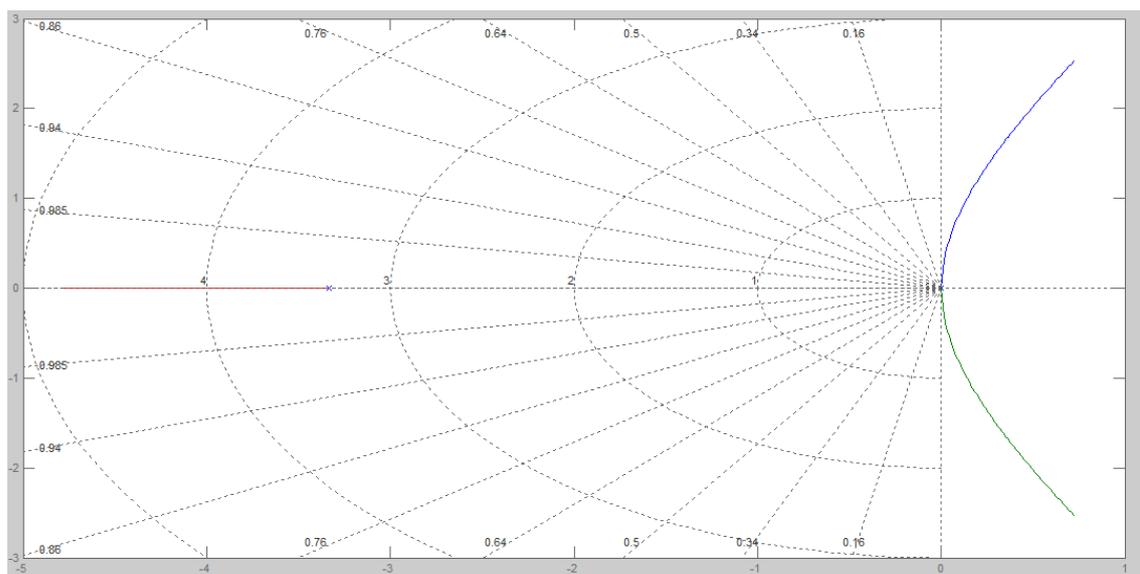
Fonte: Autoria própria (2019).

Dessa maneira:

Pode-se notar que independente do ganho do sistema sempre haverá um erro, mesmo que mínimo. Este erro é menor com a queda do ganho do controlador integrador.

A curva amarela representa a entrada do sistema com amplitude 100.

O gráfico com a aplicação do método do lugar das raízes no sistema com controlador proporcional-integral pode ser visualizado na Figura 17.

Figura 17: Método do lugar das raízes utilizando o controlador proporcional-integral.

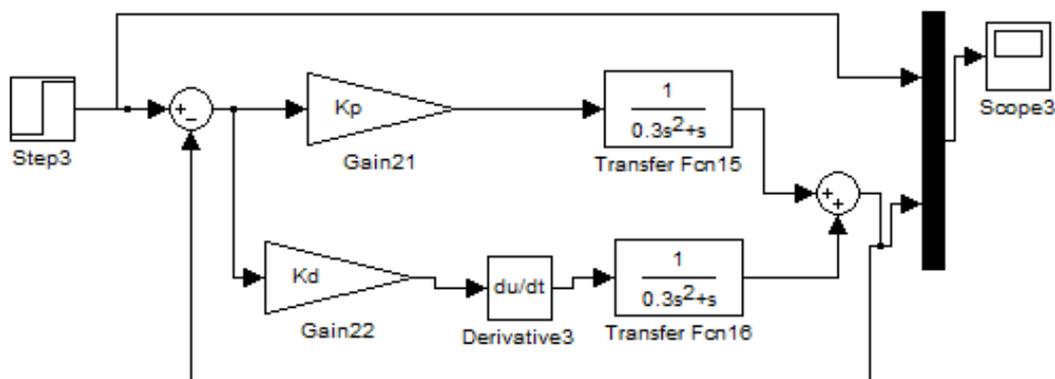
Fonte: Autoria própria (2019).

Assim, observa-se que o controlador integrador não possui nenhum ponto de trabalho que é completamente estável, o mais próximo que pode chegar é manter-se em oscilação constante. Isso faz com que nunca seja possível utilizá-lo sozinho. Podemos notar também que seu principal papel dentro do sistema é de diminuir o tempo de acomodamento do sinal.

Controlador Proporcional-Derivativo

A Figura 18 mostra o diagrama de blocos em função de K_p e K_d , que corresponde ao controlador proporcional-derivativo.

Figura 18: Sistema com controlador proporcional-derivativo.



Fonte: Autoria própria (2019).

A função de transferência para o modelo com controlador proporcional-derivativo da Figura 18 é:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_p + K_d s}{0,3s^2 + s}}{1 + \frac{K_p + K_d s}{0,3s^2 + s}} = \frac{K_d s + K_p}{0,3s^2 + s + K_d s + K_p}$$

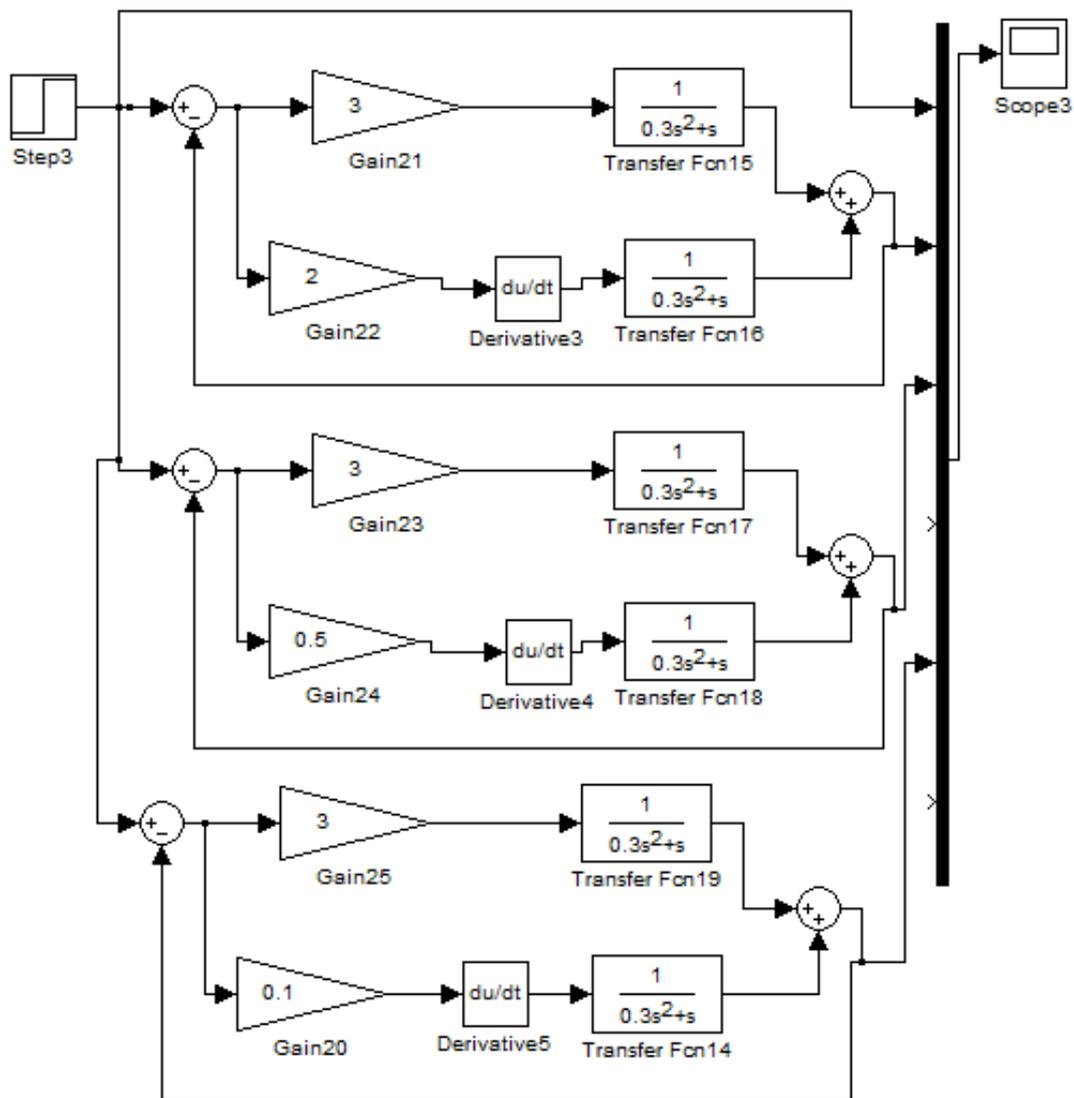
A equação característica do sistema é:

$$EC: 0,3s^2 + s + K_d s + K_p$$

$$\text{Ganho} = 1$$

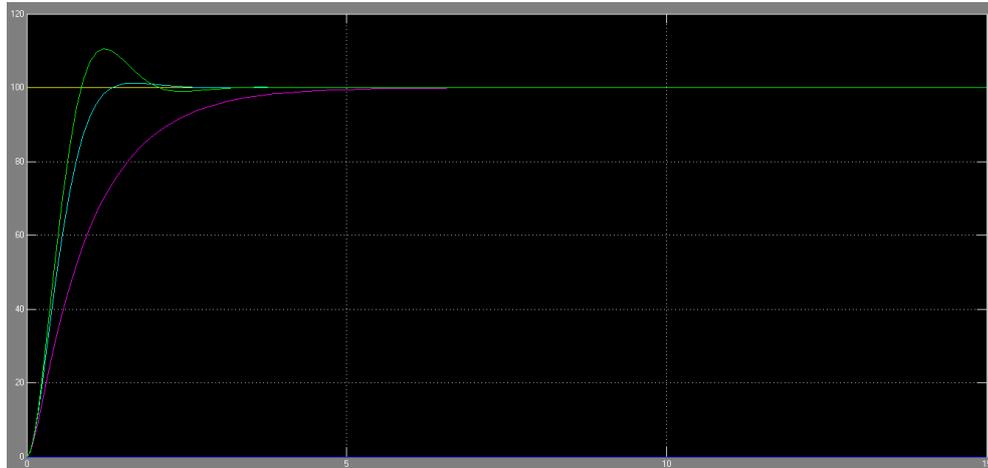
A Figura 19 exibe a simulação em diagrama de blocos do sistema de controle de malha fechada, para três valores de K_p e de K_i . E na Figura 20, é apresentado o gráfico obtido a partir desta simulação de resposta ao degrau.

Figura 19: Diagrama de blocos do sistema com controlador proporcional-derivativo para três valores de K_d .



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 20: Resultado da simulação para os três valores de K_d .



Fonte: Autoria própria (2019).

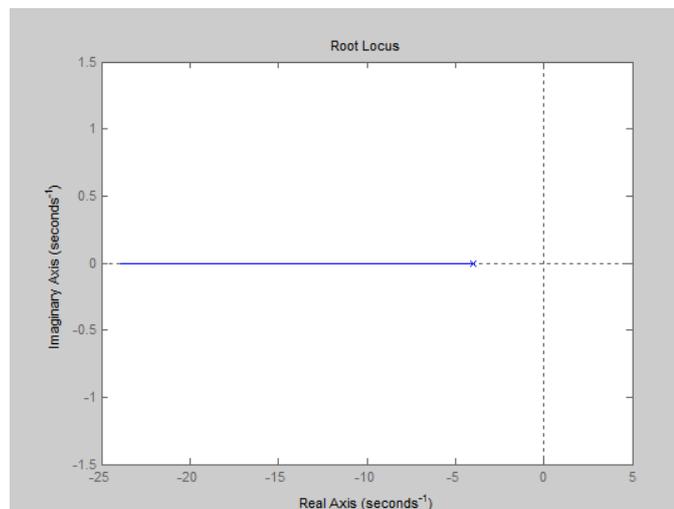
Dessa maneira:

Pode-se notar que o sinal do controlador derivativo é o oposto do controlador integrativo. Ele afeta os valores de overshoots, neutralizando, assim, um dos problemas encontrados na utilização de controladores integradores, fazendo com que o sistema seja o mais estável possível. O aumento do valor de K_d eleva o tempo de acomodação e reduz o valor do overshoot encontrado no sistema.

A curva amarela representa a entrada do sistema com amplitude 100.

O gráfico com a aplicação do método do lugar das raízes no sistema com controlador proporcional-integral pode ser visualizado na Figura 21.

Figura 21: Método do lugar das raízes utilizando o controlador proporcional-derivativo.



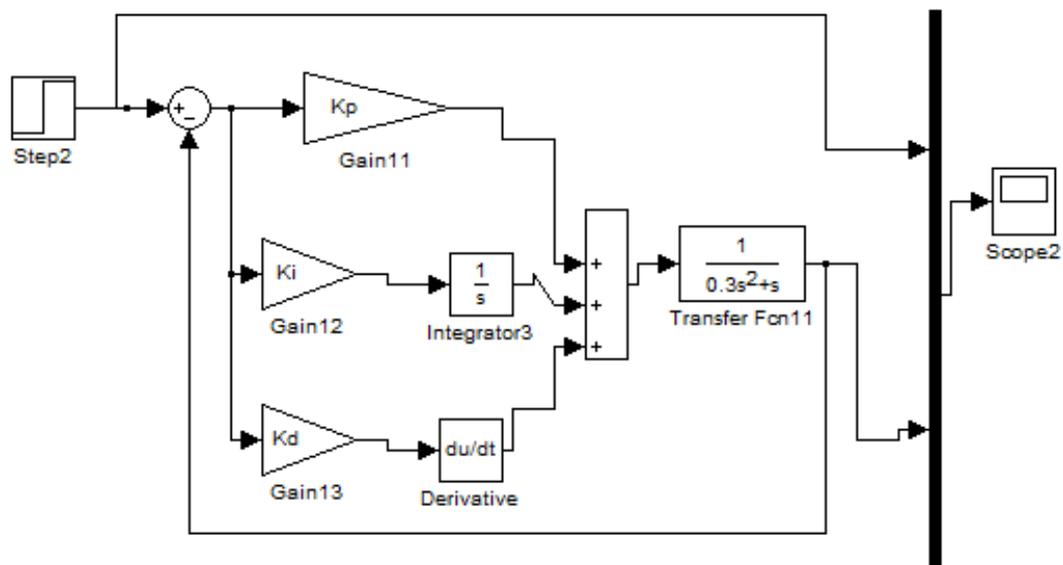
Fonte: Autoria própria (2019).

Assim, pode-se concluir que a variação de valores K_d interfere somente no tempo de acomodação, já que o gráfico de lugar das raízes mostra que elas nunca terão uma parte do valor imaginário. Sendo puramente real, independentemente do valor desse ganho, tem-se o mesmo tipo de resposta para o controlador derivativo, interferindo apenas no tempo de acomodação do circuito, que é inversamente proporcional ao ganho do controlador citado.

Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

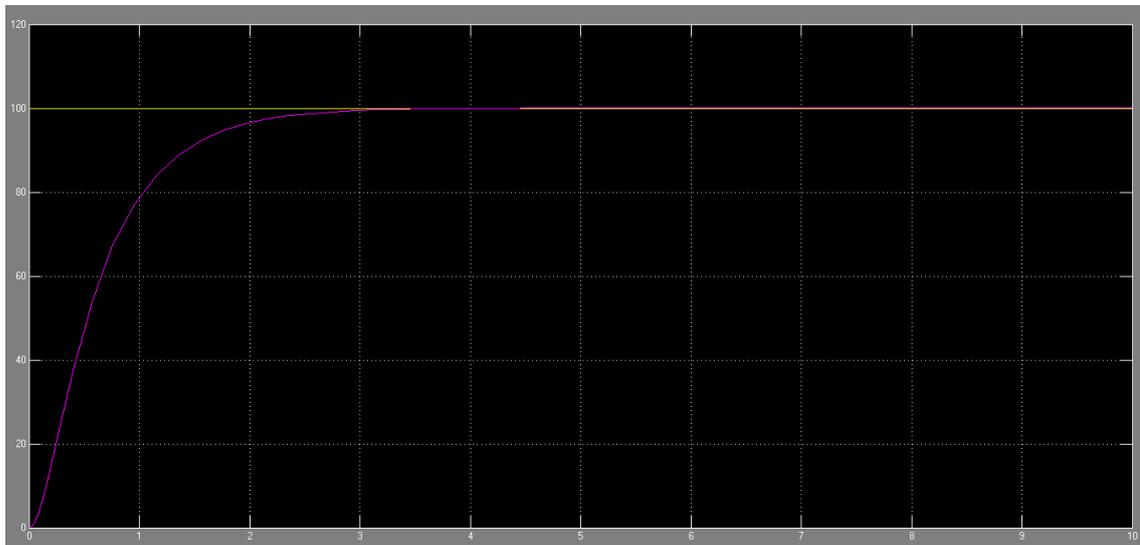
A Figura 22 exibe o diagrama de blocos em função de K_p , K_i e K_d , que corresponde aos controladores proporcional, integral e derivativo, respectivamente.

Figura 22: Diagrama de blocos do sistema proporcional-integral-derivativo (PID).



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir de simulações efetuadas com o sistema de controle proporcional-integral-derivativo (PID) apresentado na Figura 23, o melhor ajuste possível para que o elevador mantinha o controle de posição de maneira não oscilatória é quando: $K_p = 6$, $K_i = 0,003$ e $K_d = 2$.

Figura 23: Resultado da simulação do sistema proporcional-integral-derivativo (PID).

Fonte: Autoria própria (2019).

Nessa perspectiva, observa-se que em um sistema de controle de malha fechada com ações do tipo PID, a ação proporcional produz o efeito de reduzir o tempo de subida, e apenas reduz o erro de regime sem eliminá-lo. Já o controle integral elimina o erro de regime, porém piora a resposta transitória tornando-a mais oscilatória. O controle derivativo, apesar de sensível a sinais de alta frequência, melhora a estabilidade do sistema, reduzindo overshoots e amortecendo oscilações, além de produzir efeitos de antecipação nas correções. Os efeitos de K_p , K_i , e K_d são dependentes um do outro, isto é, a variação de um desses parâmetros de controle pode mudar o efeito dos outros dois sobre o sistema, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1: Efeito dos parâmetros de controle do sistema.

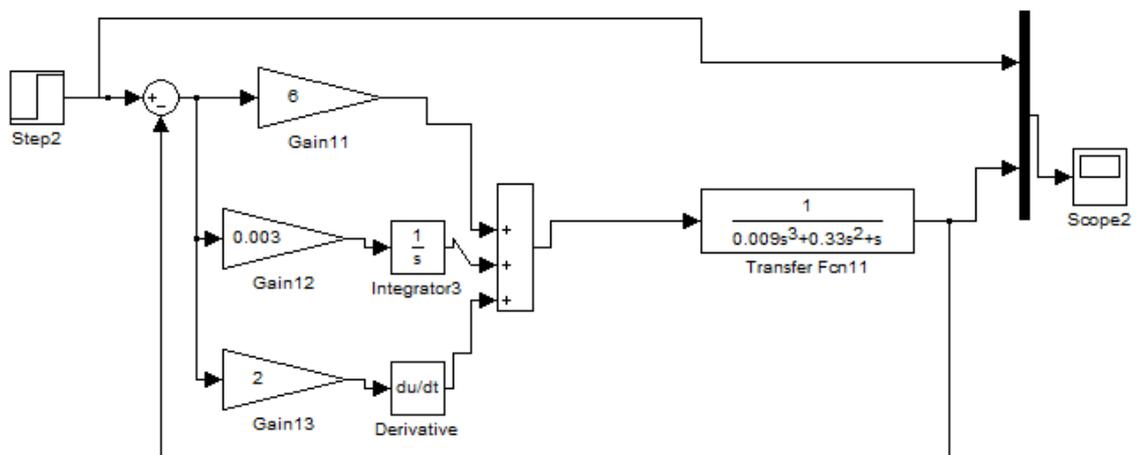
	Tempo de subida	overshoot	Tempo de acomodação	Erro estacionário
K_p	<i>Diminui</i>	<i>Aumenta</i>	<i>Pouca Influência</i>	<i>Diminui</i>
K_i	<i>Diminui</i>	<i>Aumenta</i>	<i>Aumenta</i>	<i>Elimina</i>
K_d	<i>Pouca influência</i>	<i>diminui</i>	<i>diminui</i>	<i>Pouca influência</i>

Fonte: Autoria própria (2019).

Análise da Planta do Sistema pelo Modelo de Segunda Ordem

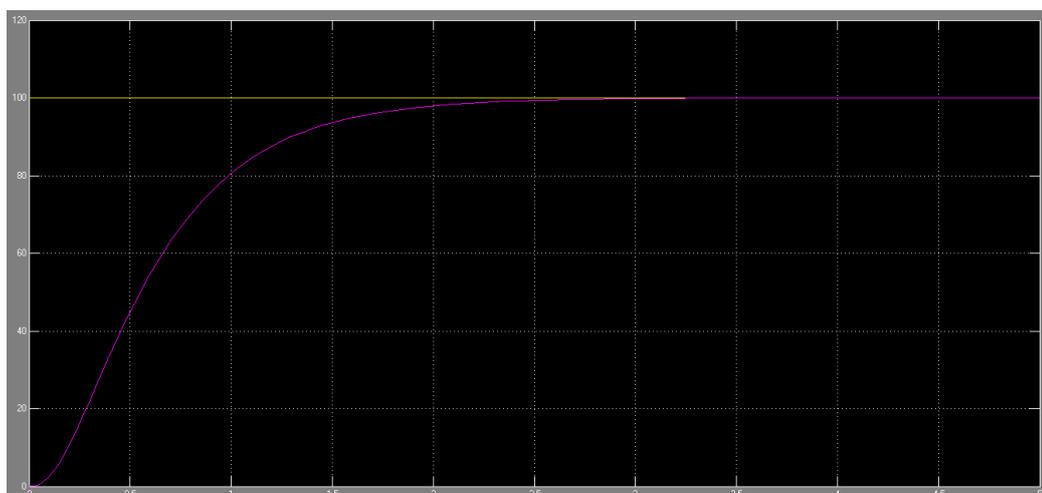
Após a simulação e análise do sistema de controle do tipo proporcional-integral-derivativo (PID) para o sistema de 1ª ordem, foi realizado o mesmo procedimento para o sistema de 2ª ordem. Na Figura 24, é apresentado o diagrama de blocos e o resultado da simulação pode ser visto na Figura 25.

Figura 24: Diagrama de blocos do sistema proporcional-integral-derivativo (PID) para o modelo de 2ª ordem.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 23: Resultado da simulação do sistema proporcional-integral-derivativo (PID) para o modelo de 2ª ordem.



Fonte: Autoria própria (2019).

Nesse sentido, nota-se que as repostas do esquema de primeira e segunda ordem para a mesma configuração do controlador PID, obtêm-se respostas semelhantes, alterando pequenos frações no tempo de acomodação e nos valores do regime transitório do sistema.

CONCLUSÕES

O controlador proporcional-integrativo-derivativo combina as vantagens dos controladores PI e PD. A ação integral está diretamente ligada à precisão do sistema sendo responsável pelo erro nulo em regime permanente. O efeito desestabilizador do controlador PI é contrabalançado pela ação derivativa que tende a aumentar a estabilidade relativa do sistema ao mesmo tempo em que torna a resposta do sistema mais breve, pois tem a capacidade de trabalhar com a previsão de variação do erro. O resultado é um circuito com erro mínimo e tempo de acomodação menor do que é conseguido utilizando os controladores PD e PI separadamente. Qualquer um dos 4 tipos de controladores poderia atender a demanda, porem aquele que melhor atende a necessidade é o controlador PID.

REFERÊNCIAS

- [1] OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, Pearson Editora, 4 ed., 2011.
- [2] LEONARDI, F. **Controle Essencial**. Pearson Editora, 1 ed., 2010.
- [3] NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 3 ed., Rio de Janeiro – RJ: LTC, 2002.
- [4] BEGA, E. A.. **Instrumentação industrial**. 2 ed. Rio de Janeiro: Inter ciência, 2006.
- [5] BINGHAM, John; DAVIES, Garth W. P. E. **Manual de análise de sistemas**. Rio de Janeiro - RJ :Inter ciência, 1977.
- [6] FIALHO, A. B. **Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2008.
- [7] TRIVELATO, G. C. **Comparação de Ambientes de Modelagem e Simulação**. INPE, São José dos Campos, SP, 2003.

[8] CHAPMAN, Stephen J. **Programação em MATLAB para engenheiros**. São Paulo – SP: Thomson, 2003.

AUTORES:

Flávia Gonçalves Fernandes, Bacharel em Engenharia da Computação com ênfase em Automação pela Universidade de Uberaba - UNIUBE. Mestre em Engenharia Biomédica pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU (2017). Doutoranda em Ciências Exatas e Tecnológicas pela Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão (UFG/RC), Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Campos Belos. E-mail: flavia.fernandes92@gmail.com

Marcos Napoleão Rabelo, Graduado em Matemática pela Universidade Federal de Uberlândia (2001), mestrado em Matemática pela Universidade de São Paulo (2003), doutorado em Matemática pela Universidade de São Paulo (2007) e Pós-Doutorado pela Escola de Engenharia de São Carlos Professor da Universidade Federal de Goiás. E-mail: rabelomn@gmail.com.