

CONTROLADOR POR ALOCAÇÃO DE POLOS APLICADO A UM SISTEMA DE SUSPENSÃO ATIVA

JOACY MESQUITA DA SILVA*, MÁRCIA LISSANDRA MACHADO PRADO*

**Laboratório de Robótica e Controle, Departamento de Tecnologia,
Universidade Estadual de Feira de Santana-BA
CEP: 44036-900, Avenida Transnordestina, S/N - Novo Horizonte
Feira de Santana, Bahia, Brasil*

Emails: joacymasilva@gmail.com, marcia.lissandra@gmail.com

Abstract— This work presents the design of a controller for an *Quanser's* active suspension system, using the concepts of pole placement and transfer function. The project can be divided into system modeling, design of the controller, and analysis of the obtained results. The intention is to ensure that the system meets the requirements of the project, and also remains stable.

Keywords— Control Theory, Pole Placement, Active Suspension System.

Resumo— Esse trabalho apresenta o projeto de um controlador para um sistema de suspensão ativa da *Quanser*, utilizando os conceitos de alocação de polos e função de transferência. O projeto pode ser dividido em modelagem do sistema, projeto do controlador, e a análise dos resultados obtidos. A intenção é de garantir que o sistema atenda aos requisitos do projeto, e também permaneça estável.

Palavras-chave— Teoria de Controle, Alocação de Polos, Sistema de Suspensão Ativa.

1 Introdução

Os sistemas de controle são importantes em diversos campos da engenharia e da ciência. Eles são utilizados nas mais diversas áreas da indústria (Ogata, 2010). Em veículos espaciais, sistemas robóticos, e operações industriais que envolvam o controle de temperatura, vazão, pressão, estabilização, direção estão exemplos de sua utilização (Nise, 2009).

O Sistema de Suspensão Ativa é um exemplo de sistema mecânico empregado em automóveis e em aplicações industriais. As suspensões veiculares têm por finalidade suportar, de forma adequada, o chassi do veículo, fazendo isolamento das vibrações causadas por irregularidades do terreno; manter o contato dos pneus com o solo de modo a manter o carro o mais estável possível; e proporcionar melhor dirigibilidade e conforto aos seus ocupantes (Côrte-Real, 2002).

O desenvolvimento de controladores para sistemas de suspensão ativa apresenta relevância, pelo fato desses sistemas possuírem função importante na indústria automobilística e em diversas aplicações industriais.

Na literatura de controle não se encontra com facilidade o projeto de controladores por função de transferência para o Sistema de Suspensão Ativa. O problema compreende a obtenção de um polinômio característico, resultante de uma alocação de polos, que atenda as especificações do projeto (Lordelo and Ferreira, 2005).

Este trabalho tem por objetivo realizar o projeto de um controlador por alocação de polos utilizando função de transferência e o teste de robustez (através da variação dos parâmetros e simulações)

do controlador obtido, a ser aplicado ao sistema de suspensão ativa.

O trabalho está dividido da seguinte forma, na Seção 2 são apresentados conceitos de alocação de polos; na Seção 3 aparece a modelagem do Sistema de Suspensão Ativa; na Seção 4 é mostrado o projeto do controlador a ser aplicado; na Seção 5 são expostos e analisados os resultados obtidos com o controlador projetado; e na Seção 6 são relatadas as conclusões do projeto.

2 Alocação de Polos

A técnica de controle por Alocação de Polos parte da suposição de que estabilidade e várias especificações de desempenho podem ser atingidas com a utilização da realimentação dinâmica da saída para alocar os polos de malha fechada do sistema em posições apropriadas do plano complexo s (Prado and Maitelli, 2012).

Considere o sistema de controle contínuo com realimentação unitária, linear e invariante no tempo, com uma entrada e uma saída (SISO), representado na Figura 1.

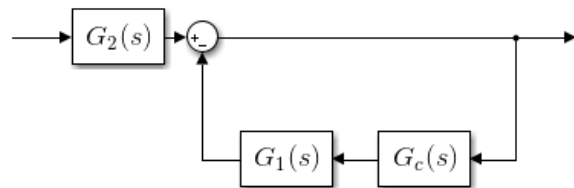


Figura 1: Sistema SISO com realimentação.

$G_1(s)$, de ordem m , é a função de transferência da saída em relação a força de controle,

$G_2(s)$, de ordem n , é a função de transferência da saída em relação a uma perturbação do sistema, e $G_c(s)$, de ordem r , é a função de transferência de um controlador a ser aplicado a $G_1(s)$. $G_1(s)$, $G_2(s)$ e $G_c(s)$ podem ser escritas no formato

$$G_1(s) := \frac{nG_1(s)}{dG_1(s)}, \quad G_2(s) := \frac{nG_2(s)}{dG_2(s)} \quad \text{e} \quad G_c(s) := \frac{nG_c(s)}{dG_c(s)},$$

onde

$$nG_1(s) := a_1s^m + a_2s^{m-1} + \dots + a_{m+1}, \quad (1)$$

$$dG_1(s) := a_{m+2}s^m + a_{m+3}s^{m-1} + \dots + a_{2m+2}, \quad (2)$$

$$nG_2(s) := c_1s^n + c_2s^{n-1} + \dots + c_{n+1}, \quad (3)$$

$$dG_2(s) := c_{n+2}s^n + c_{n+3}s^{n-1} + \dots + c_{2n+2}, \quad (4)$$

$$nG_c(s) := x_1s^r + x_2s^{r-1} + \dots + x_{r+1}, \quad (5)$$

$$dG_c(s) := x_{r+2}s^r + x_{r+3}s^{r-1} + \dots + x_{2r+2}. \quad (6)$$

com $a_{m+2} \neq 0$ e $c_{n+2} \neq 0$.

Inicialmente, assume-se que os coeficientes da planta ($a_1, a_2, \dots, a_{2m+2}$), e ($c_1, c_2, \dots, c_{2n+2}$) são precisamente conhecidos. Os parâmetros de projeto do controlador ($x_1, x_2, \dots, x_{2r+2}$) devem ser selecionados de maneira que as especificações de desempenho, traduzidas em localizações dos polos do sistema em malha fechada, sejam satisfeitas com um controlador de menor ordem possível para que o sistema resultante, em malha fechada, tenha um conjunto de $m + n + r$ polos desejados (Prado and Maitelli, 2012). O sistema em malha fechada é representado por

$$T(s) = G_2(s) \frac{1}{1 + G_1(s)G_c(s)} \quad (7)$$

$$T(s) = \frac{nG_2(s)}{dG_2(s)} \frac{1}{\frac{dG_1(s)dG_c(s) + nG_1(s)nG_c(s)}{dG_1(s)dG_c(s)}} \quad (8)$$

$$T(s) = \frac{nG_2(s)dG_1(s)dG_c(s)}{dT(s)} \quad (9)$$

com $dT(s) = dG_2(s)dG_1(s)dG_c(s) + dG_2(s)nG_1(s)nG_c(s)$.

A técnica tem por objetivo alocar os polos de $T(s)$, ou seja, as raízes de $dT(s)$. Pela Equação (9) pode ser visto que novos zeros, raízes de $nT(s)$, são introduzidos na função de transferência de malha fechada, os polos de $T(s)$ são resultados dos deslocamentos dos polos de $G_1(s)$, $G_2(s)$ e de $G_c(s)$. Para que os coeficientes das funções de transferência sejam reais, os polos complexos conjugados devem ser alocados aos pares (Prado and Maitelli, 2012).

Nesse contexto, o problema de alocação de polos é resumido na solução da equação abaixo, referente ao denominador do sistema em malha fechada

$$dT(s) = dG_2(s)dG_1(s)dG_c(s) + dG_2(s)nG_1(s)nG_c(s) \quad (10)$$

reescrevendo $dT(s)$ em função de seus coeficientes temos:

$$dT(s) := b_1s^{m+n+r} + b_2s^{m+n+r-1} + \dots + b_{m+n+r+1}$$

Contudo, em vez de resolver a Equação (10) de forma direta, pode-se transformá-la em um sistema de equações algébricas lineares. Com isso, substituindo todos os polinômios em (10) e associando os coeficientes com as potências semelhantes em s , obtém-se um sistema de $m + n + r + 1$ equações lineares da forma

$$\begin{aligned} a_1c_{n+2}x_1 + a_{m+2}c_{n+2}x_{r+2} &= b_1, \\ a_2c_{n+2}x_1 + a_1c_{n+2}x_2 + \dots + a_{m+3}c_{n+2}x_{r+2} + \\ &\quad a_{m+2}c_{n+2}x_{r+3} = b_2, \\ &\vdots \\ a_{m+1}c_{n+2}x_{r+1} + a_{2m+2}c_{n+2}x_{2r+2} &= b_{m+n+r+1}. \end{aligned}$$

Por conveniência, define-se $p := m + n + r + 1$ e $q := 2r + 2$. A Equação (10) pode ser escrita como uma equação linear no formato

$$Ax = b, \quad (11)$$

na qual A é a matriz formada pelos coeficientes de $nG_1(s)$ e $dG_1(s)$, multiplicados pelos coeficientes de $dG_2(s)$, x é o vetor composto pelos coeficientes de $G_c(s)$, e b é o vetor constituído pelos coeficientes de $dT(s)$.

Sendo $A \in \mathbb{R}^{p \times q}$,

$$x := \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_q \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^q \quad \text{e} \quad b := \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^p.$$

Na Equação (11), a matriz A é a matriz de Sylvester referente às funções $G_1(s)$ e $G_2(s)$. Os coeficientes de $nG_1(s)$, em ordem decrescente de potências de s , multiplicados pelos coeficientes de $dG_2(s)$, compõem a primeira coluna de A . A primeira coluna deslocada uma posição para baixo forma a segunda coluna, o mesmo acontece de forma sucessiva para as $r + 1$ primeiras colunas de A . Para formar a $(r + 2)$ -ésima coluna de A em diante, se repete o procedimento anterior, mas os coeficientes de $dG_1(s)$ multiplicados pelos coeficientes de $dG_2(s)$ compõem estas colunas (Prado and Maitelli, 2012).

3 Modelagem do Sistema de Suspensão Ativa

Para o projeto, foi utilizado o Sistema de Suspensão Ativa da *Quanser* (Quanser, 2013). O modelo físico concedido pelo fabricante se encontra na Figura 2.

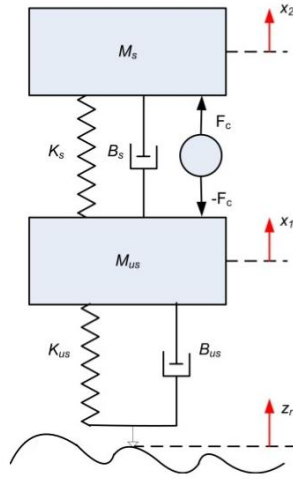


Figura 2: Modelo para o Sistema de Suspensão Ativa da Quanser (Quanser, 2013).

O Sistema consiste em duas massas móveis suportadas por um par de molas e amortecedores. A massa superior corresponde ao corpo do veículo suportado acima da suspensão, enquanto a massa inferior se refere a uma das rodas do veículo. A ondulação representa a pista. A modelagem matemática foi possível através da representação do sistema em Equações Diferenciais, as Equações (12) e (13) foram obtidas.

$$\ddot{x}_2 = -g + \frac{F_c}{M_s} + \frac{B_s}{M_s} \dot{x}_1 - \frac{B_s}{M_s} \dot{x}_2 + \frac{K_s}{M_s} x_1 - \frac{K_s}{M_s} x_2 \quad (12)$$

$$\ddot{x}_1 = -g - \frac{F_c}{M_{us}} - \frac{B_s + B_{us}}{M_{us}} \dot{x}_1 + \frac{B_{us}}{M_{us}} \dot{x}_2 + \frac{B_{us}}{M_{us}} \dot{z}_r - \frac{K_s + K_{us}}{M_{us}} x_1 + \frac{K_s}{M_{us}} x_2 + \frac{K_{us}}{M_{us}} z_r \quad (13)$$

O sistema é considerado do tipo **MISO** (Multiple Input, Single Output), possui como entradas a força de controle f_c e a perturbação z_r , que representa as ondulações da pista. A força de controle deve ser capaz de minimizar os efeitos causados pela ação da perturbação. A variável a ser controlada é x_2 , que diz respeito à posição da carceria do veículo. A variável x_1 diz respeito à posição do pneu. A aceleração da gravidade é representada pela constante g , os efeitos da força da gravidade podem ser eliminados, considerando pontos de equilíbrio do sistema. A saída considerada, variável a ser controlada, passa a ser chamada de z_s . Os valores numéricos atribuídos a cada parâmetro da Figura 2 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do Sistema de Suspensão Ativa

Parâmetro	Valor	Unidade
M_s	2,45	kg
M_{us}	1	kg
K_s	900	N/m
K_{us}	1250	N/m
B_s	7,5	N.s/m
B_{us}	5	N.s/m

Aplicando a Transformada de Laplace podemos obter a resposta em frequência do sistema, ou seja, a representação do mesmo na forma de Função de Transferência. Foram obtidas duas funções, uma relaciona a saída z_s e a força de controle F_c , chamada de $G_1(s)$, Equação (14), e a outra relaciona a saída z_s e a perturbação z_r , chamada de $G_2(s)$, Equação (15).

$$G_1(s) = \frac{s^2 + 7,5s + 1250}{dG_1(s)} \quad (14)$$

$$G_2(s) = \frac{37,5s^2 + 13875s + 1,125e06}{dG_2(s)} \quad (15)$$

com $dG_1(s) = dG_2(s) = 2,45s^4 + 38,125s^3 + 6205s^2 + 13875s + 1,125 \times 10^6$.

Para entender o comportamento do sistema, foi desenvolvida a simulação no *Simulink*, a Figura 3 nos traz a resposta natural do sistema em Malha Fechada. Por indicação do fabricante, a perturbação z_r é representada por uma onda quadrada de amplitude 0,01 m e frequência 0,3 Hz.

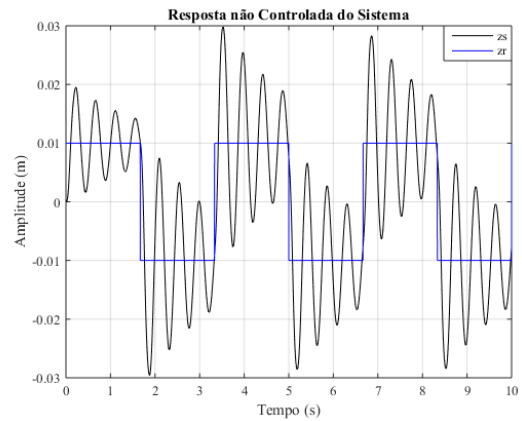


Figura 3: Resposta do Sistema em Malha Fechada.

Através da visualização da Figura 3, verificamos que a saída apresenta muita oscilação.

4 Projeto do Controlador

A planta possui um atuador responsável por aplicar a força de controle F_c , o objetivo é encontrar a

equação para o controlador, $G_c(s)$, de modo a minimizar as ondulações geradas pelo efeito da perturbação Z_r . A Figura 4 mostra a disposição dos blocos do sistema controlado.

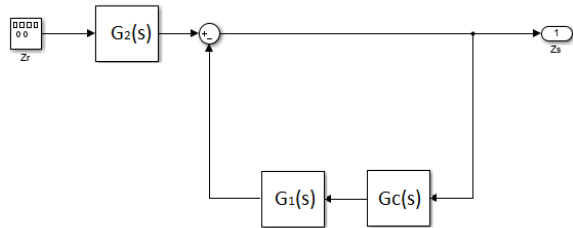


Figura 4: Diagrama de Blocos do Sistema controlado.

Foram feitas diversas tentativas com variados tipos de controlador, podendo ser destacado $G_c(s) = \frac{A_{G_c}s^3 + B_{G_c}s^2 + C_{G_c}s + D_{G_c}}{E_{G_c}s + F_{G_c}}$, que proporcionou a mesma quantidade de equações e de coeficientes de $G_c(s)$, condição necessária para que a alocação de polos seja realizada. Foi utilizado controle por Alocação de Polos para encontrar os coeficientes do controlador, o método consiste em escolher o posicionamento dos polos da equação de malha fechada do sistema, e a partir disso, encontrar a equação do denominador de malha fechada, para posteriormente relacioná-la com os coeficientes a serem encontrados para o controlador. A equação de malha fechada é representada pela Equação (16).

$$T(s) = G_2(s) \frac{1}{1 + G_1(s)G_c(s)} \quad (16)$$

sendo $G_1(s) = \frac{nG_1(s)}{dG_1(s)}$ e $G_2(s) = \frac{nG_2(s)}{dG_2(s)}$, onde $dG_1(s) = dG_2(s)$ (vide Equações (14) e (15)), e $G_c(s) = \frac{nG_c(s)}{dG_c(s)}$. $T(s)$ pode ser reescrita como mostram as Equações (17), (18) e (19).

$$T(s) = \frac{nG_2(s)}{dG_2(s)} \frac{1}{\frac{dG_1(s)dG_c(s) + nG_1(s)nG_c(s)}{dG_1(s)dG_c(s)}} \quad (17)$$

Como $dG_1(s)$ e $dG_2(s)$ são iguais, podemos chamar ambos de $dG(s)$,

$$T(s) = \frac{nG_2(s)dG(s)dG_c(s)}{P(s)} \quad (18)$$

com $P(s) = dG(s)dG(s)dG_c(s) + dG(s)nG_1(s)nG_c(s)$.

Depois de efetuar uma simplificação, foi encontrada a Equação (19), que apresenta a função de transferência de malha fechada, $T(s)$.

$$T(s) = \frac{nG_2(s)dG_c(s)}{dG(s)dG_c(s) + nG_1(s)nG_c(s)} \quad (19)$$

Para o projeto utilizando como controlador $G_c(s)$, os polos foram alocados com o intuito

de eliminar o efeito dos zeros. Foram alocados polos em $s = -250$ e $s = -120$, correspondentes às raízes de $nG_2(s)$ (zeros de $T(s)$ sem o controlador), um par de polos complexos em $s = -7,1720 + j28,6880$ e $s = -7,1720 - j28,6880$, mantendo a parte real do par complexo existente em $dG(s)nG_1(s)$ ($dT(s)$ no sistema sem controlador) e diminuindo sua parte imaginária, ou seja, sua frequência, e alocado também um polo real em $s = -5$, com o intuito de não haver sobrelevação. Com isso o denominador da função de transferência de malha fechada, $dT(s) = (s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)$, pode ser encontrado. A Equação (20) se refere a $dT(s)$.

$$dT(s) = s^5 + 389,344s^4 + 3,8103 \times 10^4 s^3 + 9,3477 \times 10^5 s^2 + 3,0002 \times 10^7 s + 1,3117 \times 10^8 \quad (20)$$

Conhecendo o denominador de malha fechada, foi possível encontrar os coeficientes do controlador, através da resolução de um sistema de equações lineares, no formato $Ax = b$ (vide Seção 2). Foram obtidos $A_{G_c} = -9,531$, $B_{G_c} = 15,42$, $C_{G_c} = 1,885 \times 10^4$, $D_{G_c} = 1520$, $E_{G_c} = 4,298$, e $F_{G_c} = 114.9$. A matriz A e o vetor b são apresentados nas Equações (21) e (22). A Equação (23) se refere a $G_c(s)$.

$$A = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & 0 & D_1 & 0 \\ N_2 & N_1 & 0 & 0 & D_2 & D_1 \\ N_3 & N_2 & N_1 & 0 & D_3 & D_2 \\ 0 & N_3 & N_2 & N_1 & D_4 & D_3 \\ 0 & 0 & N_3 & N_2 & D_5 & D_4 \\ 0 & 0 & 0 & N_3 & 0 & D_5 \end{bmatrix} \quad (21)$$

com $N_1 = 1$, $N_2 = 7,5$, $N_3 = 1250$, $D_1 = 2,45$, $D_2 = 38,13$, $D_3 = 6205$, $D_4 = 13875$, e $D_5 = 1,125 \times 10^6$.

O vetor b e controlador $G_c(s)$ tornam-se:

$$b = \begin{bmatrix} 1 \\ 389,344 \\ 3,8103 \times 10^4 \\ 9,3477 \times 10^5 \\ 3,0002 \times 10^7 \\ 1,3117 \times 10^8 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$G_c(s) = \frac{-9,531s^3 + 15,42s^2 + 1,885 \times 10^4 s + 1520}{4,298s + 114,9} \quad (23)$$

5 Resultados

Nesta Seção são apresentados os resultados obtidos por simulações, já que no laboratório ainda não há a planta do sistema trabalhado.

Conhecendo o controlador e a disposição dos blocos em Malha Fechada, a resposta do sistema controlado pode ser obtida no *Matlab*. A Figura 5 mostra o resultado dessa simulação. A Figura 6

apresenta o Sinal de Controle resultante da ação de $G_c(s)$.

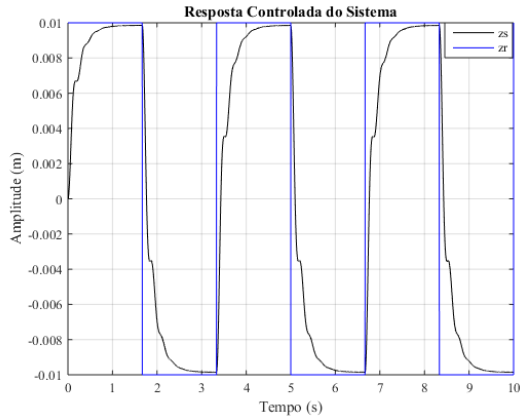


Figura 5: Resposta do Sistema com Controlador.

Pode ser verificado que, além de reduzir de forma considerável as oscilações apresentadas pelo sistema, a ação do controlador proporcionou a diminuição do erro de regime, tornando-o quase nulo.

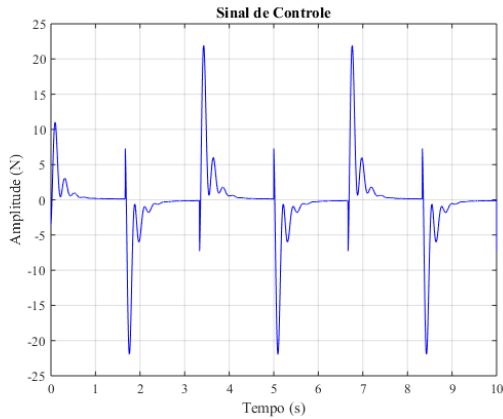


Figura 6: Sinal de Controle do Sistema.

No que se refere ao Sinal de Controle, foi encontrado um sinal (em módulo) menor que $25N$, e verificando a especificação vemos que ele está na faixa aceitável, onde $F_{cmax} = 30N$.

5.1 Teste de Robustez do Controlador $G_c(s)$

Para testar a robustez do controlador $G_c(s)$, Equação (23), obtido na Seção 4 foram aplicadas variações nos parâmetros da planta e efetuadas as simulações para obtenção e análise das respostas encontradas.

Após a variação, os parâmetros passam a representar intervalos, e não um valor escalar. Será avaliado o comportamento do sistema em malha fechada e do controlador, levando em consideração os diversos valores apresentados pelos parâmetros da planta.

No primeiro caso foram levadas em consideração as variações de K_s e K_{us} em 3%, e de B_s e B_{us} em 10%.

Os valores numéricos atualizados atribuídos a cada parâmetro são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do Sistema de Suspensão Ativa

Parâmetro	Valor	Unidade
M_s	2,45	kg
M_{us}	1	kg
K_s	[873, 927]	N/m
K_{us}	[1212,5, 1287,5]	N/m
B_s	[6,75, 8,25]	N.s/m
B_{us}	[4,5, 5,5]	N.s/m

Para a simulação, foram utilizados 7 valores do intervalo de cada parâmetro que sofreu variação, totalizando 2401 iterações. A Tabela 3 apresenta os 7 valores considerados para K_s , K_{us} , B_s e B_{us} .

Tabela 3: Valores Utilizados para os Parâmetros dentro do Intervalo

Valor	K_s	K_{us}	B_s	B_{us}
1	873	1212,5	6,75	4,5
2	882	1225	7	4,67
3	891	1237,5	7,25	4,83
4	900	1250	7,5	5
5	909	1262,5	7,75	5,17
6	918	1275	8	5,33
7	927	1287,5	8,25	5,5

A Figura 7 traz as várias respostas do Sistema, sem a presença do controlador, com variação dos parâmetros, em Malha Fechada.

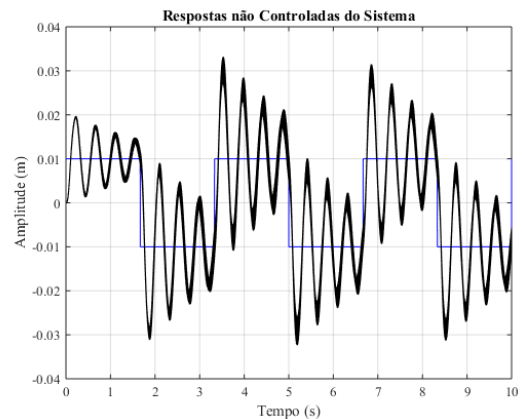


Figura 7: Respostas não Controladas do Sistema com variação de K_s e K_{us} em 3%, e B_s e B_{us} em 10%.

A Figura 8 apresenta as respostas do Sistema, com a ação do controlador $G_c(s)$.

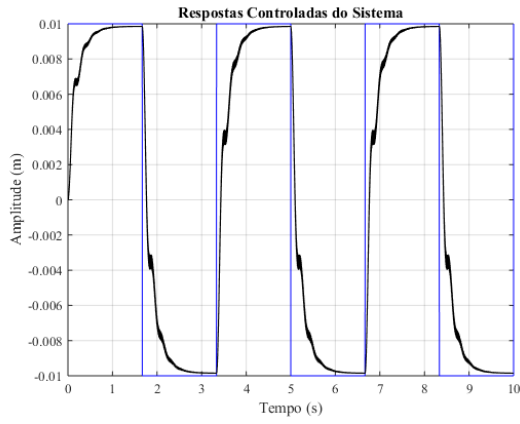


Figura 8: Respostas Controladas do Sistema com variação de K_s e K_{us} em 3%, e B_s e B_{us} em 10%.

A Figura 9 mostra os vários Sinais de Controle resultantes da ação de $G_c(s)$ e a variação de parâmetros da planta.

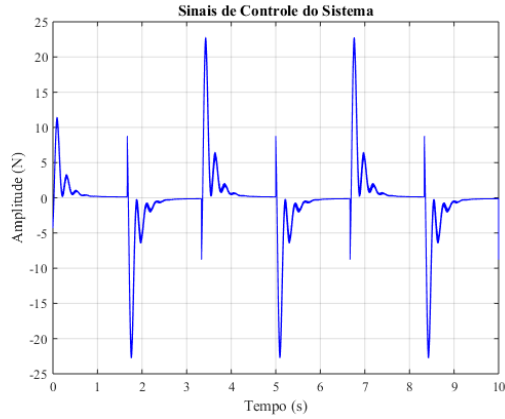


Figura 9: Sinais de Controle do Sistema com variação de K_s e K_{us} em 3%, e B_s e B_{us} em 10%.

No segundo caso foram levadas em consideração as variações de K_s e K_{us} em 5%, e de B_s e B_{us} em 10%.

Os valores numéricos atualizados atribuídos a cada parâmetro são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros do Sistema de Suspensão Ativa

Parâmetro	Valor	Unidade
M_s	2,45	kg
M_{us}	1	kg
K_s	[855, 945]	N/m
K_{us}	[1187,5, 1312,5]	N/m
B_s	[6,75, 8,25]	N.s/m
B_{us}	[4,5, 5,5]	N.s/m

Para essa simulação, também foram utilizados 7 valores do intervalo de cada parâmetro que sofreu variação, realizando um total de 2401 ite-

rações. A Tabela 5 apresenta os 7 valores considerados para K_s , K_{us} , B_s e B_{us} .

Tabela 5: Valores Utilizados para os Parâmetros dentro do Intervalo

Valor	K_s	K_{us}	B_s	B_{us}
1	855	1187,5	6,75	4,5
2	870	1208,33	7	4,67
3	885	1229,17	7,25	4,83
4	900	1250	7,5	5
5	915	1270,83	7,75	5,17
6	930	1291,67	8	5,33
7	945	1312,5	8,25	5,5

A Figura 10 traz as várias respostas do Sistema, sem a presença do controlador, com variação dos parâmetros, em Malha Fechada.

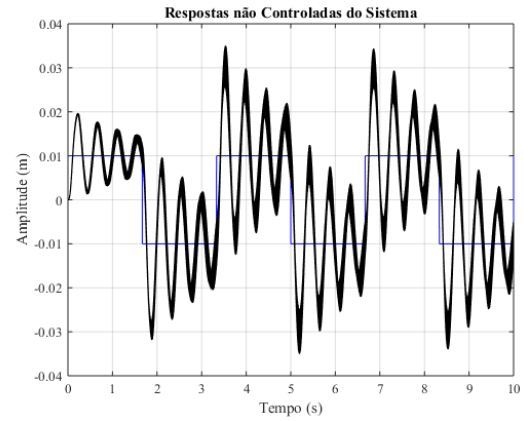


Figura 10: Respostas não Controladas do Sistema com variação de K_s e K_{us} em 5%, e B_s e B_{us} em 10%.

A Figura 11 apresenta as respostas do Sistema, com a ação do controlador $G_c(s)$.

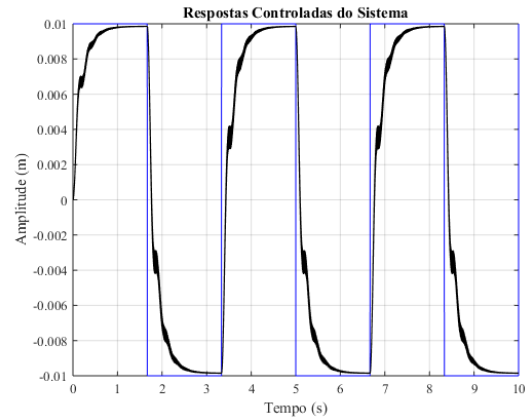


Figura 11: Respostas Controladas do Sistema com variação de K_s e K_{us} em 5%, e B_s e B_{us} em 10%.

A Figura 12 mostra os vários Sinais de Controle resultantes da ação de $G_c(s)$ e a variação de

parâmetros da planta.

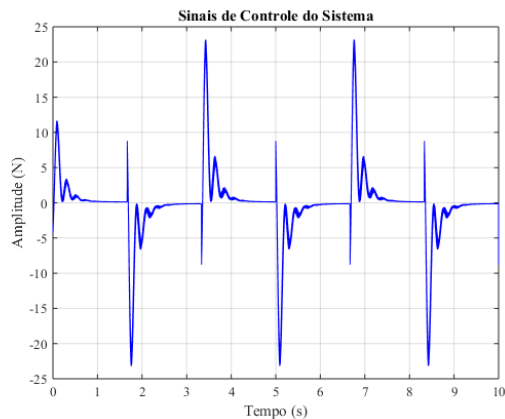


Figura 12: Sinais de Controle do Sistema com variação de K_s e K_{us} em 5%, e B_s e B_{us} em 10%.

Nos dois casos de variação dos parâmetros, assim como no resultado obtido sem a variação, pode ser verificado que as oscilações apresentadas pelo sistema foram diminuídas de forma considerável, e também que a ação do controlador proporcionou a diminuição do erro de regime.

No que se refere ao Sinal de Controle, o resultado também foi satisfatório, mais uma vez foi encontrado um sinal (em módulo) menor que 25N, e por consequência $< 30N$.

6 Conclusões

Analisando os resultados obtidos com o projeto do controlador por Alocação de Polos foi possível perceber que o sistema atende as especificações do projeto, ocasionou a minimização das oscilações do veículo e quase zerou o erro de regime. Além disso, vimos que o sinal de controle apresentou valores dentro do esperado.

O projeto do controlador por Alocação de Polos se mostrou eficaz, visto que mesmo considerando variações nos parâmetros da planta, a ação do controlador obtido resultou no atendimento das especificações.

Foram feitas tentativas de aplicar a Análise Intervalar Modal (Sainz et al., 2014) para efetuar o projeto de controladores robustos (Prado and Paz, 2008) para o Sistema de Suspensão Ativa, mas não foram obtidos resultados satisfatórios.

Como trabalho futuro pode ser citado o projeto de controladores robustos via programação alvo para o Sistema de Suspensão Ativa, considerando o sistema com Realimentação de Estados, utilizando a metodologia proposta por (Lordelo and Ferreira, 2005). Além disso, poderia se fazer a implementação prática do controlador no sistema real caso se conseguisse obter a planta do sistema.

Agradecimentos

Agradecemos a UEFS e a Fapesb pelo apoio financeiro, e a UEFS pela infraestrutura concedida para a realização do trabalho.

Referências

- Côrte-Real, E. W. (2002). *Dessensibilização da estrutura de controle LQG aplicada ao modelo de uma suspensão ativa utilizando a técnica PRABI*, Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia.
- Lordelo, A. D. and Ferreira, P. A. (2005). Análise intervalar e projeto de controladores robustos via programação alvo, *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica* 16(2): 111–123.
- Nise, N. S. (2009). *Engenharia de Sistemas de Controle*, 5 edn, LTC, Rio de Janeiro.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno*, 5 edn, Prentice Hall, São Paulo.
- Prado, M. L. M. and Maitelli, A. L. (2012). Controle robusto por alocação de pólos aplicado a um sistema de dois tanques, *XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande* 1: 5479–5486.
- Prado, M. and Paz, M. (2008). Controle robusto utilizando estrutura pd e análise intervalar modal, *XIII Congresso Latinoamericano de Control Automatico, Mérida* pp. 204–209.
- Quanser (2013). *Active Suspension Laboratory Guide*, Quanser, EUA.
- Sainz, M. A., Armengol, J. and i Puig, R. C. (2014). *Modal Interval Analysis: New Tools for Numerical Information*, Springer, Suíça.