

Universidade Federal do ABC
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica

Reginaldo Cardoso

TÉCNICAS DE PROJETO DE CONTROLADORES PARA
UMA SUSPENSÃO ATIVA

Santo André – SP

2014

Reginaldo Cardoso

TÉCNICAS DE PROJETO DE CONTROLADORES
PARA UMA SUSPENSÃO ATIVA

Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica da Universidade Federal do ABC, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica.

Orientador: Prof. Dr. Magno Enrique Mendoza Meza

Santo André – SP

2014

Reginaldo Cardoso

TÉCNICAS DE PROJETO DE CONTROLADORES
PARA UMA SUSPENSÃO ATIVA

Este Trabalho de Graduação foi julgado e aprovado para a obtenção do Grau de Bacharel de Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica no Curso de Engenharia de Instrumentação, Automação e Robótica da Universidade Federal do ABC.

Santo André – SP, 22 de Abril de 2014

Prof. Dr. Roberto Jacobe Rodrigues
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Magno Enrique Mendoza Meza
Orientador

Prof. Dr. Pedro Sérgio Pereira Lima
UFABC

RESUMO

Este trabalho foca-se na comparação de quatro técnicas de controle aplicadas a um quarto do sistema de suspensão ativa com dois graus de liberdade. O modelo da suspensão ativa consiste em duas massas, onde cada uma delas é sustentada por uma mola e um amortecedor. Uma das massas representa um quarto da massa da carroceria e a outra representa o conjunto roda mais eixo. Entre as massas, está localizada a suspensão ativa, que é representada por uma mola, um atuador (um servomotor) e um amortecedor. Uma mola e um amortecedor posicionados paralelamente simulam a rigidez do pneu em contato com o solo. O objetivo dos controladores é reduzir o excesso de vibração na carroceria. O primeiro dos controles propostos é uma realimentação de estados observados, no qual o observador é de ordem plena. Apesar do sistema de suspensão ativa da Quanser® ter todas as suas variáveis de estado disponíveis, optou-se por fazer o observador, pois do ponto de vista prático, na maioria dos casos não está disponível. O observador foi utilizado também no controlador *skyhook*, que utiliza a velocidade da carroceria e do conjunto roda-eixo, aplicando um ganho para cada uma das velocidades e realimentando o sistema. Foi desenvolvido um controlador *fuzzy* (tipo Mandani), onde as entradas do controlador foram a velocidade relativa entre as massas e a velocidade da carroceria e como saída a força. Em comparação com trabalhos existentes na área, utilizou-se também o controlador do tipo LQR (*Linear Quadratic Regulator*). Comparando os resultados das simulações o controlador *fuzzy* apresentou um melhor tempo de acomodamento e máximo sobre sinal seguido pelo LQR, realimentação de estados e o *skyhook*. O controlador *fuzzy*, também foi o que mais reduziu o excesso de oscilações na carroceria e no conjunto eixo mais roda, aumentando o conforto dos passageiros e melhorando a estabilidade do veículo.

Palavras-chave: *Suspensão Ativa, Fuzzy, Realimentação de Estados, Observador de Ordem Completa, Skyhook, LQR.*

ABSTRACT

This work focuses on comparison of four control techniques applied to a quarter of the active suspension with two degrees of freedom system. The model of the active suspension consists of two masses, where each of them is supported by a spring and a damper. One of the masses represents a quarter of the mass of the body and the other is the wheel set shaft more. Between the masses is located active suspension, which is represented by a spring, an actuator (a servo motor) and a shock absorber. A spring and a damper positioned parallel simulate the stiffness of the tire in contact with the ground. The objective of the controllers is to reduce the excessive vibration in the body. The first control proposed is the state feedback with observed states, where is used the full order observer. Despite the active suspension of Quanser ® have all your available system state variables , it was decided to make the viewer because of the practical point of view, in most cases is not available . The observer was also used in skyhook controller, which uses the speed of the bodywork and the wheel, applying a gain for each speed and feeding the system. A fuzzy controller (type Mandani), where the entries of the controller were the relative velocity between the mass and velocity of the body and the controller output were the force. Compared to existing work in this area, it is also the controller of the type used LQR (Linear Quadratic Regulator). Comparing the simulation results showed the fuzzy controller a better time for complacency and maximum signal followed by LQR, state feedback and skyhook. The fuzzy controller was that more reduced the excess oscillations in body and wheel, increasing passenger comfort and improve vehicle stability.

Key-words: Active Suspension, Fuzzy, State Feedback, Full Order Observe, Skyhook, LQR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de suspensão <i>quarter-car</i> .	- 15 -
Figura 2 - Forças que atuam na carroceria.	- 16 -
Figura 3 - Forças que atuam no conjunto eixo mais roda.	- 16 -
Figura 4 - Diagrama de blocos do controle por realimentação de estados.	- 21 -
Figura 5 - Deslocamento do solo, Z_r .	- 22 -
Figura 6 - Erro do observador, simulação.	- 24 -
Figura 7 – Resposta com o controlador de realimentação de estados observados, simulação.	- 25 -
Figura 8 – Esforço com o controlador de realimentação de estados observados, simulação.	- 25 -
Figura 9 - Representação do controle <i>Skyhook</i> .	- 26 -
Figura 10 - Diagrama de blocos do controlador <i>skyhook</i> .	- 28 -
Figura 11 – Resposta com o controlador <i>skyhook</i> , simulação.	- 28 -
Figura 12 - Esforço do controlador <i>skyhook</i> , simulação.	- 29 -
Figura 13 - Função de pertinência da variável de entrada, velocidade da carroceria.	- 31 -
Figura 14 - Função de pertinência da variável de entrada, velocidade relativa entre as massas.	- 31 -
Figura 15 - Função de pertinência da variável de saída, força.	- 32 -
Figura 16 - Diagrama de blocos do controlador <i>fuzzy</i> .	- 35 -
Figura 17 – Resposta com o controlador <i>fuzzy</i> , simulação.	- 35 -
Figura 18 - Esforço do controlador <i>fuzzy</i> , simulação.	- 36 -
Figura 19 - Diagrama de blocos do controlador LQR.	- 37 -
Figura 20 – Resposta com o controlador LQR, simulação.	- 38 -
Figura 21 - Esforço do controlador LQR, simulação.	- 38 -
Figura 22 - Deslocamento do solo, Z_r , simulação.	- 39 -
Figura 23 - Erro de regime na implementação, controle LQR.	- 40 -
Figura 24 – Esforço do controlador por realimentação de estados saturada, implementação.	- 41 -
Figura 25 – Erro do observador, implementação.	- 42 -
Figura 26 - Resposta com o controlador por realimentação de estado, implementação.	- 43 -
Figura 27 – Esforço do controlador por realimentação de estados, implementação.	- 44 -
Figura 28 - Resposta com o controlador <i>skyhook</i> , implementação.	- 45 -
Figura 29 - Esforço do controlador <i>skyhook</i> , implementação.	- 45 -
Figura 30 - Resposta com o controlador <i>fuzzy</i> , implementação.	- 46 -
Figura 31 - Esforço do controlador <i>fuzzy</i> , implementação.	- 46 -
Figura 32 - Resposta com o controlador LQR, implementação.	- 47 -
Figura 33 – Esforço do controlador LQR, implementação.	- 48 -
Figura 34 - Saída Z_s do LQR, presença de ruído.	- 49 -
Figura 35 - Saída ($Z_s - Z_{us}$), escorregamento do cabo.	- 49 -

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da suspensão ativa.	- 19 -
Tabela 2 - Estratégia do controle on/off.	- 33 -
Tabela 3 - Regras do controlador <i>fuzzy</i>	- 34 -
Tabela 4 - Comparação entre os controladores.	- 50 -

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	- 10 -
1.1	JUSTIFICATIVA.....	- 12 -
1.2	OBJETIVOS.....	- 12 -
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	- 13 -
3	MODELAGEM DA PLANTA.....	- 14 -
4	DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES.....	- 19 -
4.1	OBSERVADOR DE ESTADOS.....	- 19 -
4.2	CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO DE ESTADO BASEADO NO ESTADO OBSERVADO.....	- 20 -
4.3	CONTROLE <i>SKYHOOK</i>	- 26 -
4.4	CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	- 29 -
4.4.1	<i>Definição das variáveis de entrada e saída.....</i>	<i>- 30 -</i>
4.4.2	<i>Caracterização do intervalo de valores das variáveis de entrada e saída.....</i>	<i>- 30 -</i>
4.4.3	<i>Definição do conjunto de funções de pertinência.....</i>	<i>- 30 -</i>
4.4.4	<i>Definição da base de regras.....</i>	<i>- 32 -</i>
4.4.5	<i>Definição do mecanismo de inferência.....</i>	<i>- 34 -</i>
4.5	REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO.....	- 36 -
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	- 40 -
5.1	OBSERVAÇÕES ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO.....	- 40 -
5.2	RESULTADO EXPERIMENTAL DO CONTROLADOR DE REALIMENTAÇÃO DE ESTADOS.....	- 40 -
5.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONTROLADOR <i>SKYHOOK</i>	- 44 -
5.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	- 46 -
5.5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONTROLADOR LQR.....	- 47 -
6	CONCLUSÃO.....	- 50 -
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 52 -
8	ANEXO A.....	- 54 -

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística vem crescendo e inovando com o objetivo de diminuir o custo de produção e oferecer produtos com tecnologia de ponta, isto vem ocorrendo desde a década de 80 com a introdução de inovadores métodos de produção, com o avanço da microeletrônica e com a inserção das montadoras japonesas no mercado internacional de maneira competitiva (CARVALHO, 2008).

Muitas destas inovações acabaram sendo utilizadas em outras áreas, podendo citar como exemplo o sistema de suspensão, que foi concebido com o intuito de isolar a carroceria dos pneus e assim garantir o conforto, a dirigibilidade e estabilidade do veículo ao motorista. Atualmente, com o aperfeiçoamento deste sistema podem-se encontrar aplicações que vão desde a construção civil até a elaboração de prótese humana (CRIVELLARIO, 2008).

Sistemas passivos são compostos apenas por uma mola e um amortecedor, o seu funcionamento se dá ao fato da força de amortecimento não ser constante, esta força variável depende da intensidade da compressão da suspensão, assim, quando o carro passa por um obstáculo abrupto, a suspensão possui uma força de amortecimento que vai aumentando conforme a mola e o amortecedor vão sendo comprimidos, garantindo assim a funcionalidade e eficiência da suspensão e ao mesmo tempo o conforto e segurança dos passageiros do veículo.

Segundo CRIVELLARIO (2008), suspensão ativa caracteriza-se por possuir um atuador entre a roda e a carroceria do carro capaz de inserir ou retirar energia do sistema utilizando esforços que são variáveis. Estes atuadores necessitam de sensores que medem o deslocamento e a aceleração da carroceria e da própria suspensão como sinais de entrada. Desta forma, no sistema ativo a força empregada entre roda e carroceria não depende apenas do movimento relativo entre estes, mas também de outras variáveis, como por exemplo, aceleração da carroceria e posição da roda e da carroceria.

Apesar da suspensão ativa apresentar altos níveis de conforto e estabilidade ela também apresenta muitos problemas práticos na implementação. Por exemplo, o sistema ativo de suspensão necessitaria de um atuador hidráulico para operar e o consequente motor ou bomba com uma potência elevada (2 kW), e desta forma o sistema de suspensão consumiria uma parcela significativa da potência do motor (20% da potência de um motor de 60 hp) (CRIVELLARIO,

2008), aumentando assim de modo considerável o consumo do veículo e invalidando, em termos de mercado, o projeto.

O sistema semi-ativo de suspensão não possui a capacidade de injetar energia no sistema, algo que ocorre com a suspensão ativa, são capazes apenas de armazenar ou dissipar energia do sistema. Desta forma, a suspensão semi-ativa não é capaz de atingir os níveis de conforto e estabilidade de uma suspensão ativa, porém apresenta uma robustez superior e custo inferior ao sistema de suspensão ativa. O sistema semi-ativo pode ser utilizado para amenizar a grande diferença entre sistemas puramente ativos e passivos, sendo que como é um “meio termo” entre estas duas suspensões (STUTZ, 2005).

Assim, a suspensão semi-ativa necessita de um atuador com a propriedade de dissipar ou armazenar forças continuamente variáveis, sendo que este atuador é um amortecedor constituído geralmente por válvulas eletromecânicas (VANNUCI, 1992), ou utilizando fluido magneto reológico (MR) juntamente com um circuito e válvulas magnéticas. O fluido MR apresenta certa vantagem em relação às válvulas eletromecânicas: apresentam respostas mais rápidas, são mais robustos e menos suscetível a falhas.

Um dos poucos problemas do fluido MR é seu relativo custo, que é elevado, porém com investimento e fabricação deste fluido em grandes quantidades, a tendência é que este possa ser usado em veículos de preços menores com boa aceitação do mercado.

Analisando a literatura sobre suspensões, verificou-se que a maioria dos controles empregados em suspensões semi-ativa são do tipo *skyhook* e *fuzzy* em conjunto com algum controle ótimo (neste caso suspensão semi-ativa com fluido MR) (TUSSET, 2008). Sendo assim, foi proposto o projeto de dois controladores de realimentação de estados observados (*skyhook* e realimentação de estados) e um controlador *fuzzy*. Todos os controles propostos neste trabalho foram comparados com o controlador *Linear Quadratic Regulator* (LQR) projetado pelo fabricante do equipamento.

Este trabalho divide-se em três partes, a primeira consiste em entender a modelagem da suspensão utilizada pelo fabricante a segunda parte consiste no projeto dos controladores e simulações, já a terceira parte consiste em implementar os controladores no equipamento da QUANSER “*Active Suspension Plant*” e fazer a comparação dos controles propostos com o controlador LQR projetado pelo fabricante.

1.1 Justificativa

A aplicação de sistema ativo em automóveis de médio porte (caminhonetes, carros do tipo *Off Road* e os SUV, *Sport Utility Vehicle*), podem ser usados como solução de conforto e estabilidade. Devido ao valor de mercado ser mais elevado e possuírem uma necessidade maior, se comparado com os veículos de luxo ou superesportivos, que geralmente rodam em ruas perfeitamente pavimentadas. Pode ser usado como solução para melhorar o conforto e estabilidade.

1.2 Objetivos

Este trabalho consiste no desenvolvimento do controle de uma suspensão ativa, com dois graus de liberdade que tem como objetivos:

- Compreender a modelagem usada pelo fabricante do equipamento (QUANSER *Active Suspension Plant*).
- Projetar e simular um controle com realimentação de estados, os quais são obtidos por meio de um observador de ordem plena.
- Projetar e simular um controle do tipo *skyhook*, que terá como parâmetro a velocidade da massa da carroceria e do conjunto eixo mais roda, que também são obtidos por meio do observador de ordem plena.
- Projetar e simular um controlador *fuzzy* (Mandani) que terá como variável de entrada a velocidade relativa entre as duas massas e a velocidade da carroceria e como saída a força.
- Implementar os controles projetados no equipamento da QUANSER. Analise e comparação com o controlador LQR proposto pelo fabricante.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

PICADO (1998) fez um estudo com os principais tipos de suspensões semiativas, neste estudo ele levou em consideração a viabilidade econômica que depende da rapidez do controle, capacidade de processamento do hardware e os custos de instalação e manutenção. Utilizou o controle ótimo semi-ativo, *clipped optimal*, *skyhook* e redes neurais. PICADO (1998) chegou à conclusão que o controle utilizando redes neurais teria um custo mais elevado, em processamento, se comparado com os demais, mas a sua utilização poderia prover soluções mais simples à medida que o sistema fica mais complexo, diminuição do número de sensores e diminuição no tempo de resposta do controlador, pois não necessita de observador de estado.

SZÁSZI *et al.* (2002) utilizou o modelo *quarter-car* não linear junto com o método LPV (*Linear Parameter-Varying*) que considera as incertezas da não linearidade da suspensão. Foi implementado um controle ativo com um atuador hidráulico que é controlado por uma servo-válvula. As simulações foram comparadas entre o sistema linearizado e o sistema não linear e mostraram que a força aplicada no sistema linearizado apresentou significativa diferença do não linear.

MAIA (2002) propôs um modelo numérico para os componentes da suspensão (massa, pneu e amortecedor). Para cada um deles levou em consideração as suas singularidades, sendo que dividiu a suspensão em traseira e dianteira. Posteriormente fez uma junção com as duas elaborando um modelo numérico completo. Demonstrando como cada componente influencia no comportamento do automóvel.

STUTZ (2005) fez uso do modelo *half-car*, rígido e flexível para realizar a síntese e análise de uma suspensão semiativa usando um amortecedor com fluido MR. Utilizou uma função de aproximação baseada no método de Newton refletivo (*Reflective Newton Method*) para a obtenção dos parâmetros dos modelos *Bingham*, *Bouc-Wen* e *Bouc-Wen* Modificado. Como controle foram usados, um para controlar a tensão de entrada no amortecedor MR (*clipped control*) e outro (controle de estrutura variável e modos deslizantes) para fazer o controle da suspensão como um todo. As voltagens geradas pelo algoritmo de controle do amortecedor MR eram descontínuas e conseqüentemente podem resultar em uma força de controle com um elevado conteúdo em alta frequência. Como comparação foi desenvolvida uma suspensão ativa com o controle *Linear Quadratic Geometric* (LQG). O desempenho da suspensão ativa se mostrou mais eficaz que a semia-tiva com fluido MR. STUTZ (2005) enfatiza que mesmo assim

é uma boa aplicabilidade, pois são mais simples, apresentam um menor custo de implementação e não requerem uma demanda elevada de energia.

CORRÊA (2011) desenvolveu o modelo de um veículo completo com 7 graus de liberdade com amortecedores ativos. Para estudar o comportamento dinâmico sobre excitações verticais, levando em consideração três movimentos, de elevação, balanço e de rolagem. No sistema foi aplicadas excitações com perfil senoidal e randômico e uma transformação desacopladora na entrada. Foram utilizados três métodos para a estabilização do sistema: uma filtragem dos coeficientes da mola de maneira que a aceleração da carroceria (acima e abaixo da frequência natural) diminua um laço de controle interno para controlar as vibrações das rodas e um controle *skyhook* para proporcionar um controle da altura da carroceria. Como resposta houve uma melhora nas acelerações de elevação, balanço e rolagem nas altas e baixas frequências e a atenuação das constantes da mola reduz as perturbações da estrada, mas pode bater nos limitadores do percurso da suspensão.

3 MODELAGEM DA PLANTA

O modelo *quarter-car* é feito isolando um quarto do veículo e estudando-o. Este modelo pode ser aplicado somente para veículos com o seu peso distribuído igualmente.

A representação deste modelo pode ser observada na Figura 1. O modelo é composto por duas massas, uma massa suspensa representa a carroceria do veículo e outra massa não suspensa que representa o eixo e a roda. As duas massas estão separadas por uma mola e por um amortecedor. Conforme TUSSET (2008), os resultados são muito próximos do modelo completo e geralmente este modelo usa apenas dois graus de liberdade, que são: o deslocamento vertical da carroceria e do conjunto eixo mais roda.

As irregularidades da pista são representadas pela amplitude do sinal Z_r

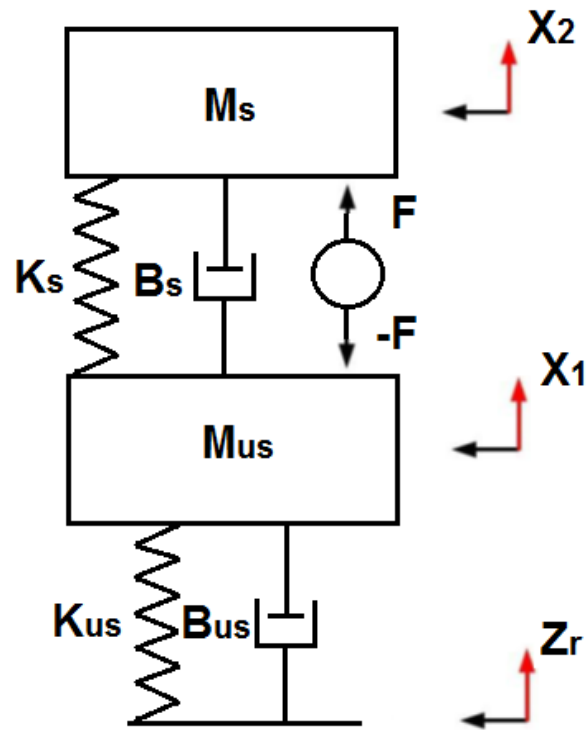


Figura 1 - Modelo de suspensão *quarter-car*.

Fonte: QUANSER, (2010).

onde:

M_s = representa a massa da carroceria;

M_{us} = representa a massa do eixo mais roda;

B_s = representa o amortecedor passivo de uma estrutura convencional;

B_{us} = representa o pneu;

K_s = feixe de molas;

K_{us} = representa o pneu;

X_1 = os movimentos verticais da roda;

X_2 = os movimentos verticais da carroceria;

F = representa a força do amortecedor ativo.

Os diagramas de corpo livre podem ser observados nas Figuras 2 e 3, assumindo que todas as condições iniciais são zero.

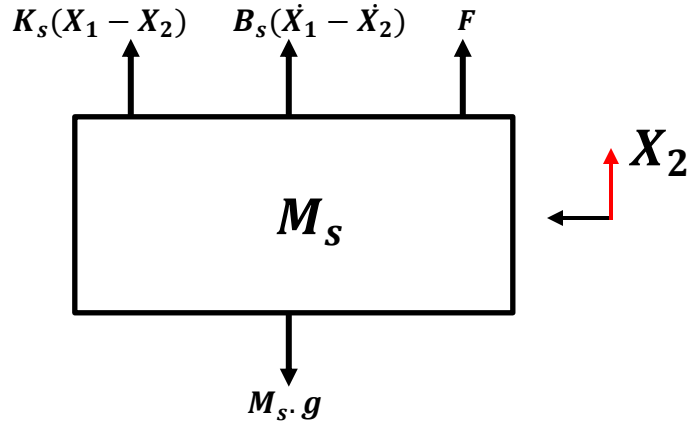


Figura 2 - Forças que atuam na carroceria.

Fonte: QUANSER, (2010).

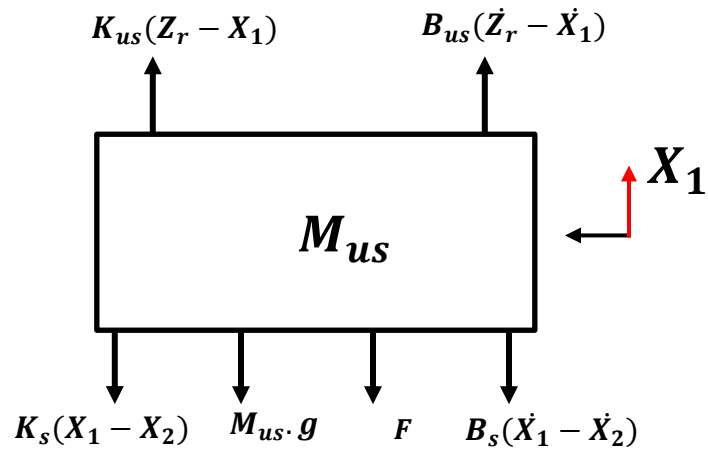


Figura 3 - Forças que atuam no conjunto eixo mais roda.

Fonte: QUANSER, (2010).

Para a representação da força presente em cada elemento da suspensão, foi utilizado o deslocamento relativo, onde $K_s(X_1 - X_2)$ representa a força da mola que é dado pelo deslocamento entre a massa da carroceria e do conjunto eixo mais roda e $B_s(\dot{X}_1 - \dot{X}_2)$ representa a força do amortecedor passivo que é dado pela diferença entre as acelerações da carroceria e do conjunto eixo mais roda. De acordo com RILL (2003), a representação mais simples da força dos pneus pode ser feita usando um sistema igual ao de uma suspensão passiva (amortecedor passivo mais uma mola), assim $K_{us}(Z_r - X_1)$ e $B_{us}(\dot{Z}_r - \dot{X}_1)$ representa a força devido a rigidez do pneu que é dado pela diferença entre a posição e a aceleração da irregularidade da pista e do conjunto eixo mais roda.

Aplicando a 2ª Lei de Newton ($\sum F = m.a$), obtemos um sistema que representa a equação do movimento da suspensão, Equação (1),

$$\begin{aligned} -g M_s + F + B_s(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_s(X_1 - X_2) &= M_s \ddot{X}_2 \\ -g M_{us} - F - B_s(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_s(X_1 - X_2) + B_{us}(\dot{Z}_r - \dot{X}_1) + K_{us}(Z_r - X_1) &= M_{us} \ddot{X}_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Rearranjando a Equação (1) de modo que ele fique com a aceleração em evidência, conforme Equação (2),

$$\begin{aligned} \ddot{X}_2 &= -g + \frac{1}{M_s} [F + B_s(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_s(X_1 - X_2)] \\ \ddot{X}_1 &= -g + \frac{1}{M_{us}} [-F - B_s(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) - K_s(X_1 - X_2) + B_{us}(\dot{Z}_r - \dot{X}_1) + K_{us}(Z_r - X_1)]. \end{aligned} \quad (2)$$

A próxima etapa é calcular o ponto de equilíbrio do sistema e fazer com que a suspensão trabalhe em torno do seu ponto de equilíbrio desta forma poderemos eliminar a força da gravidade que neste caso não influencia na dinâmica do sistema (QUANSER, 2010).

Para a obtenção do modelo *quarter-car* foi feito uma generalização, considerando o amortecedor e a mola em um estado relaxado na prática, isto não ocorre devido à massa da carroceria e do conjunto eixo mais roda que esta comprimindo todo o sistema.

O ponto de equilíbrio do sistema é obtido supondo que o sistema está parado, sem movimento, mas com a suspensão sendo comprimida pela força peso das massas e com as entradas (F e Z_r) nulas. Desta maneira, obtém-se a Equação (3),

$$\begin{aligned} X_1 &= Xeq_1 = -\frac{(M_s + M_{us})g}{K_{us}} \\ X_2 &= Xeq_2 = -\frac{M_s g}{K_s} - \frac{(M_s + M_{us})g}{K_{us}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Depois de calculado o ponto de equilíbrio do sistema, faz-se uma mudança de variável, conforme Equação (4) para garantir que a atuação do sistema fique em torno do ponto de equilíbrio,

$$\begin{aligned} X_1 &= Z_{us} + Xeq_1 & X_2 &= Z_s + Xeq_2 \\ \dot{X}_1 &= \dot{Z}_{us} + 0 & \dot{X}_2 &= \dot{Z}_s + 0 \\ \ddot{X}_1 &= \ddot{Z}_{us} + 0 & \ddot{X}_2 &= \ddot{Z}_s + 0 \end{aligned} \quad (4)$$

posteriormente substitui-se na Equação (2) a Equação (4), resultando na Equação (5),

$$\begin{aligned} \ddot{Z}_s &= \frac{1}{M_s} [F + B_s(\dot{Z}_{us} - \dot{Z}_s) + K_s(Z_{us} - Z_s)] \\ \ddot{Z}_{us} &= \frac{1}{M_{us}} [-F - B_s(\dot{Z}_{us} - \dot{Z}_s) - K_s(Z_{us} - Z_s) + B_{us}(\dot{Z}_r - \dot{Z}_{us}) + K_{us}(Z_r - Z_s)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Agora temos a equação representa a dinâmica da suspensão, onde \ddot{Z}_s , \dot{Z}_s e Z_s representam a aceleração, velocidade e a posição da carroceria, respectivamente e \ddot{Z}_{us} , \dot{Z}_{us} e Z_{us} representam a aceleração, velocidade e posição do conjunto eixo mais roda, respectivamente (QUANSER, 2010).

Realizando as seguintes transformações, para facilitar na mudança de estado de espaço:

$$x_1 = Z_s - Z_{us}; x_2 = \dot{Z}_s; x_3 = Z_{us} - Z_r; x_4 = \dot{Z}_{us}$$

o sistema (5) pode ser escrito na forma de espaço de estados:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_2 - x_4 \\ x_2 &= -\frac{K_s}{M_s}x_1 - \frac{B_s}{M_s}x_2 + \frac{B_s}{M_s}x_4 + \frac{F}{M_s} \\ x_3 &= x_4 - \dot{Z}_r \\ x_4 &= +\frac{K_s}{M_{us}}x_1 + \frac{B_s}{M_{us}}x_2 - \frac{K_s}{M_{us}}x_3 - \frac{B_s + B_{us}}{M_s}x_4 + \frac{B_{us}}{M_{us}}\dot{Z}_r - \frac{F}{M_{us}} \end{aligned} \quad (6)$$

representando na forma matricial:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (7)$$

onde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ \frac{-K_s}{M_s} & \frac{-B_s}{M_s} & 0 & \frac{B_s}{M_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_s}{M_{us}} & \frac{B_s}{M_{us}} & \frac{-K_{us}}{M_{us}} & -\frac{B_s+B_{us}}{M_{us}} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} \\ -1 & 0 \\ \frac{B_{us}}{M_{us}} & -\frac{1}{M_{us}} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_s}{M_s} & -\frac{B_s}{M_s} & 0 & \frac{B_s}{M_s} \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} \end{bmatrix};$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} \dot{Z}_r \\ F \end{bmatrix}; y = \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}.$$

4 DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES

Para o desenvolvimento dos controladores foi utilizado o software MATLAB/SIMULINK. As simulações e implementações que foram realizadas, utilizou-se os seguintes valores para os parâmetros presente nas matrizes (A , B , C e D), conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros da suspensão ativa.

Símbolo	Valor	Unidade
K_s	900,00	N/m
K_{us}	2500,00	N/m
M_s	2,45	Kg
M_{us}	1,00	Kg
B_s	7,50	$[N/m]s$
B_{us}	5,00	$[N/m]s$

Fonte: (QUANSER, 2010).

4.1 Observador de Estados

Como pode ser visto na seção anterior o sistema não possui todas as suas variáveis de estado disponíveis para realimentação. Neste caso será preciso fazer uma estimação dos estados não mensurados, que é chamado de observador de estados. Um dispositivo (ou programa de computador) que estima ou observa as variáveis de estado. Se eles observarem todas as variáveis de estados do sistema é chamado de observadores de ordem plena, se as variáveis observadas forem apenas $n-m$ onde n é a dimensão do vetor de estado e m a dimensão do vetor de saída, neste caso o sistema possui m variáveis disponíveis e será necessário observar somente as que não estão disponíveis, observador de ordem reduzida (OGATA, 2003).

O sistema possui uma variável disponível (x_1), neste caso seria necessário um observador de ordem reduzida, para obter as outras variáveis (x_2 , x_3 e x_4), para fins de simplicidade será projetado um observador de ordem completa.

4.2 Controle por realimentação de estado baseado no estado observado

Para obtenção do observador de ordem plena uma condição teve que ser adotada, o sistema possui duas entradas (F e \dot{Z}_r), mas somente uma delas interessa (F) a outra será considerado como uma constante (\dot{Z}_r). Desta maneira, as matrizes (u , B e D) da Equação (7) ficam com o seguinte formato:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_s} \\ 0 \\ -\frac{1}{M_{us}} \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M_s} \end{bmatrix} \text{ e } u = [F]$$

O sistema é completamente observável e controlável. Desta forma o modelo matemático do observador será o mesmo da planta, exceto pelo acréscimo do erro de estimação para compensar as incertezas das matrizes A e B . O erro de estimação é a diferença entre a saída medida (y) e a saída estimada ($C\tilde{x} + Du$). Assim, o modelo matemático do observador é definido:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= A\tilde{x} + Bu + K_e(y - C\tilde{x} - Du) \\ &= (A - K_e C)\tilde{x} + Bu + K_e(y - Du) \end{aligned} \quad (8)$$

onde \tilde{x} é o estado observado e $C\tilde{x} + Du$ é a saída estimada. A matriz K_e e denominada matriz de ganho do observador, que é uma matriz de correção da diferença entre a saída medida e a saída estimada.

Para o controle por realimentação de estado baseado no estado observado (de malha fechada), usa-se a Equação (9) como entrada nas Equações (7) e (8),

$$u = -K\tilde{x} \quad (9)$$

A matriz K é uma matriz de ganho de realimentação que produzirá ao sistema a característica desejada (OGATA, 2003).

O controle por realimentação de estado baseado em observador de ordem plena resulta na determinação das matrizes K_e e K . A matriz K_e faz com que o erro do observador ($e = x - \tilde{x}$) convirja para zero. A matriz K faz com que o sistema se comporte de maneira desejável (estável).

Para projetar a matriz K utilizou-se a alocação de pólos, de modo que o sistema atenda as seguintes características: tempo de acomodação igual a 0,5s ($t_s=0,5s$) e um máximo sobre sinal de 10% ($M_p=0,1$), obteve-se, assim, os dois pólos dominantes os outros dois pólos foram obtidos

multiplicando por dez a parte real dos pólos dominantes, estes valores foram escolhidos com a intenção de minimizar a oscilação na carroceria privilegiando o conforto dos passageiros, pois os pólos dominantes estão localizados próximo ao eixo imaginário mas não muito próximo pois quanto mais próximo do eixo imaginário estiverem mais oscilatória será a resposta do sistema. Os pólos complexo conjugado do sistema sem controle são: $-6,94 \pm j58,72$ e $-0,84 \pm j16,18$.

Por meio da fórmula de Ackermann, comando “acker” ou “place” do Matlab, como pode ser visto no Anexo A, obteve a matriz K . Os polos obtidos em malha fechado do sistema com controle são: $-8,00 \pm j10,92$ e os outros dois polos em $-80,00$.

Uma vez projetada a matriz K resta projetar a matriz K_e , segundo OGATA (2003), os pólos do observador tem que ser de duas a cinco vezes mais rápido que os do controlador. No caso da suspensão, após vários testes, observou-se que para um melhor desempenho do observador, os pólos referentes aos estados x_1 e x_2 teriam que ser três vezes mais rápido e os pólos x_3 e x_4 cinco vezes mais rápido que o polo do controlador para cada respectivo estado, o programa desenvolvido pode ser visto no Anexo A, assim os pólos do observador são: $-24,0 \pm j32,73$ e os outros dois pólos em $-400,00$.

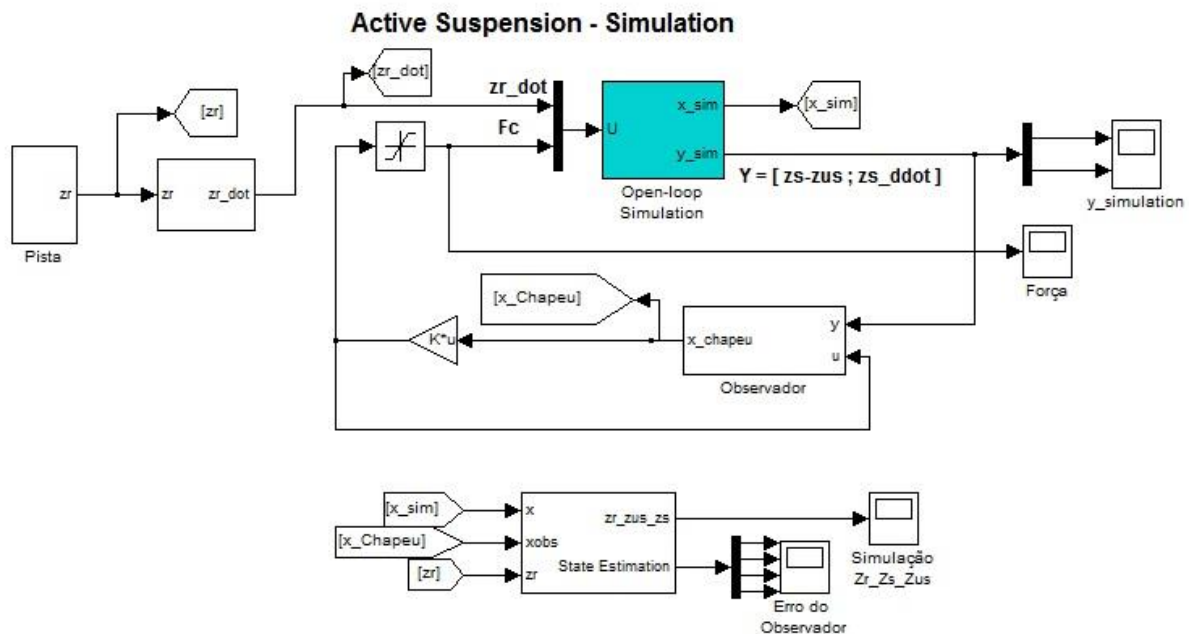


Figura 4 - Diagrama de blocos do controle por realimentação de estados observados.

Na Figura 4, pode-se observar que a planta possui duas saídas (y e x_{sim}), deve-se ao fato de ter utilizado a matriz C e D da planta da seguinte forma:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_s}{M_s} & -\frac{B_s}{M_s} & 0 & \frac{B_s}{M_s} \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M_s} \end{bmatrix}$$

assim a planta do sistema terá uma saída composta por dois vetores, no vetor da parte de cima estão os estados do sistema e na parte de baixo estão a saída y . Desta maneira pode-se obter o erro de todos os estados observados.

Para representar a perturbação proveniente da estrada (solo, Z_r) foi utilizada uma onda quadrada, conforme a Figura 5. Optou-se em utilizar uma forma de onda quadrada para representar a passagem de um carro por um buraco. A amplitude de 2,0cm do buraco pode não parecer grande, mas considerando que o curso máximo da suspensão do equipamento é de 3,8cm, este buraco representaria aproximadamente 53% do curso total da suspensão.

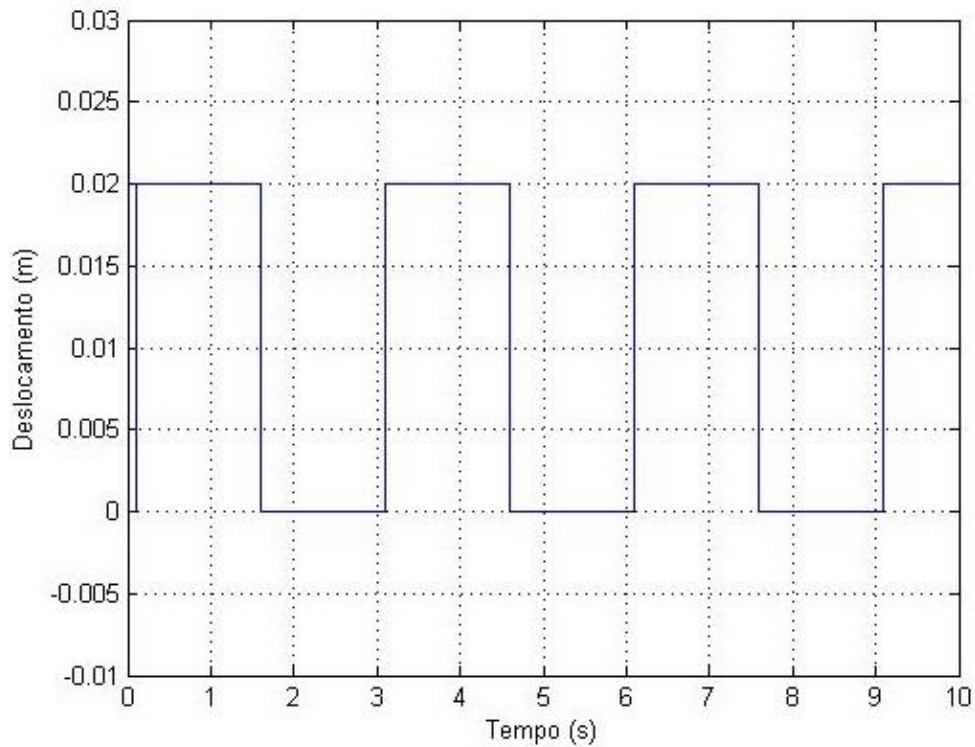


Figura 5 - Deslocamento do solo, Z_r .

O tempo adotado para todas as simulações foi de 10 segundos e com um tamanho de passo fixo de 1 ms. Para verificar a qualidade do observado (erro do observador), comparou-se o resultado obtido com o observado e com o resultado proveniente da saída (x_{sim}), o resultado

pode ser visto na Figura 6. O observado projetado apresentou um resultado satisfatório, pois os piores estados, que são os estados x_2 e x_4 , apresentaram um tempo de acomodação de 0,172s e 0,238s respectivamente, assim, a diferença entre o estado observado e o simulado tende à zero rapidamente. O estado x_2 possui uma pequena diferença, sendo que a diferença tende para zero antes de entrar em regime permanente, o mesmo ocorre com o estado x_3 . Já o estado x_4 foi o que apresentou o pior resultado, um pouco lento o tempo de resposta.

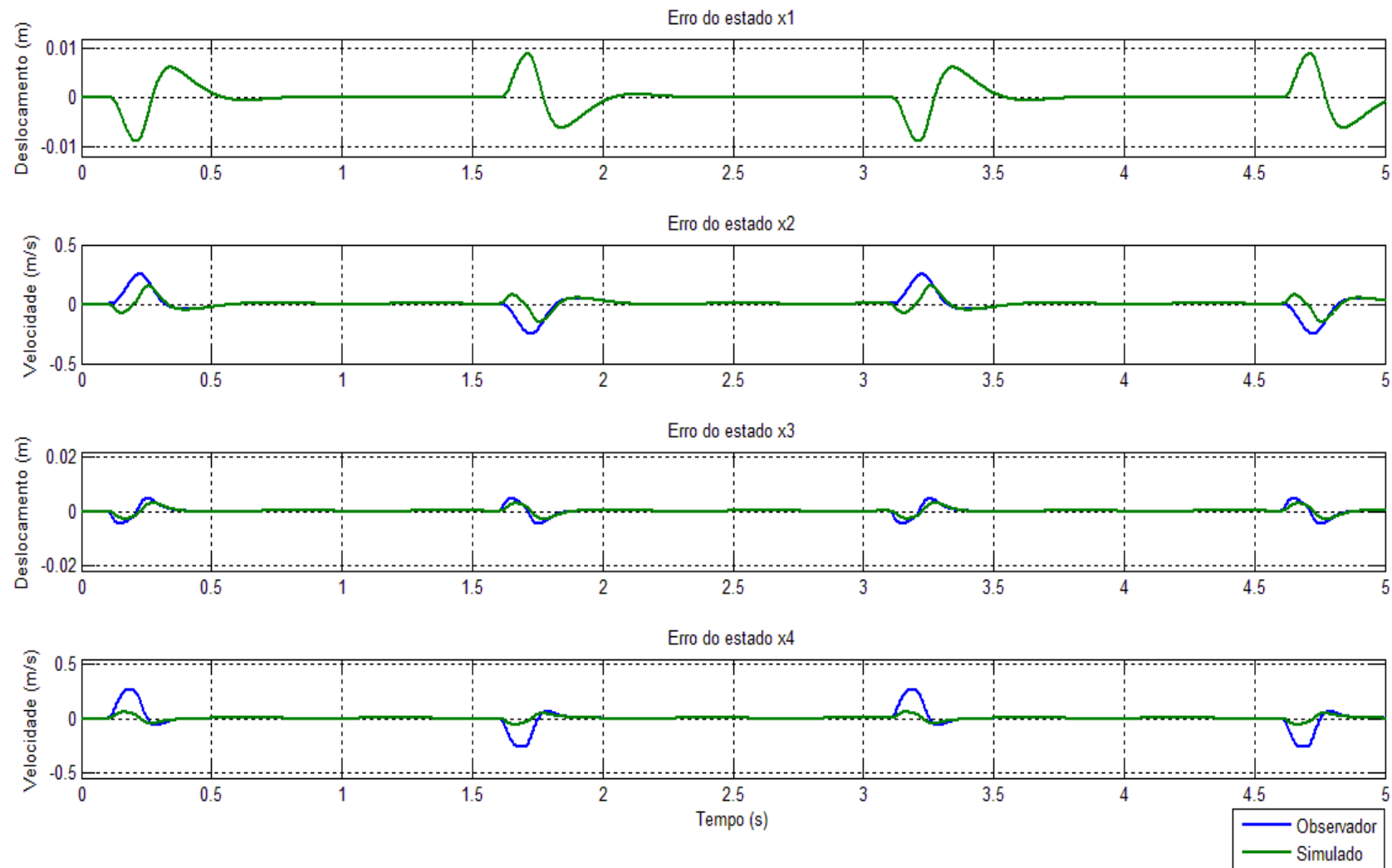


Figura 6 - Erro do observador, simulação.

O resultado da simulação do controlador por realimentação de estados observados pode ser visto na Figura 7, nela pode-se verificar que o máximo sobre sinal da carroceria foi de 35% com um tempo de acomodação de 0,617s

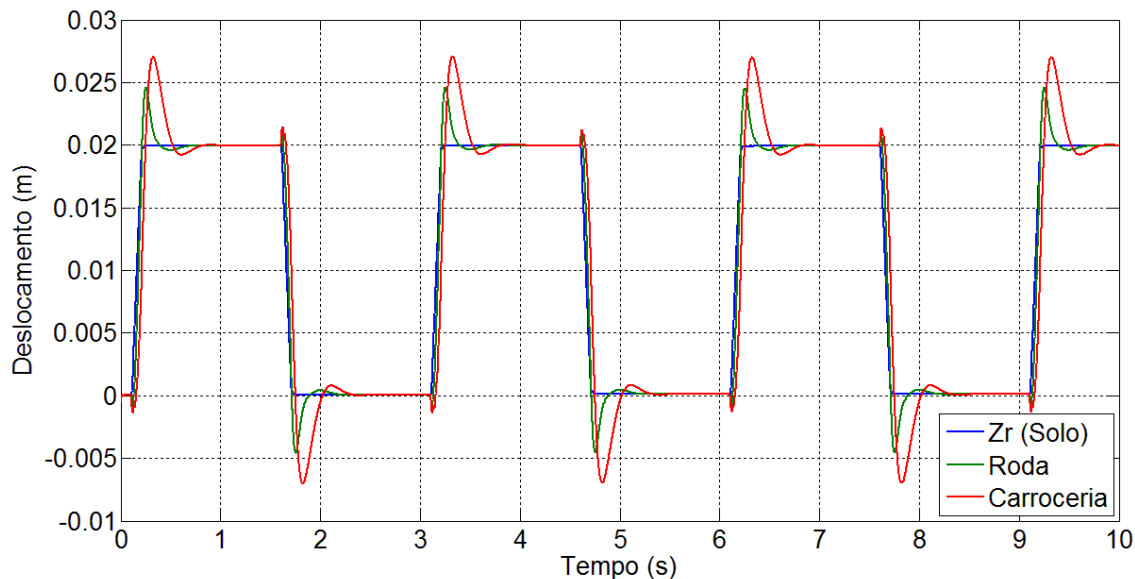


Figura 7 – Resposta com o controlador de realimentação de estados observados, simulação.

Outro resultado que tem que ser acompanhado de perto para não danificar o equipamento é à força de entrada, pois o equipamento satura para valores fora do range de -39,2 a 39,2N. Por este motivo em todos os controles foi observado também a força de entrada no equipamento. Para este controle com realimentação de estados observados a força atingiu picos próximos a 10N, conforme Figura 8.

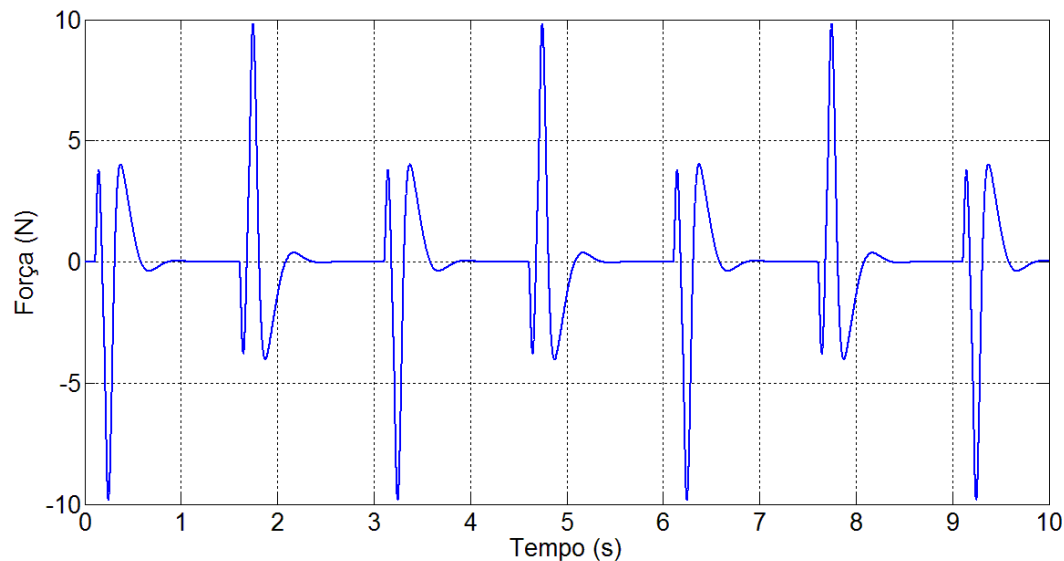


Figura 8 – Esforço com o controlador de realimentação de estados observados, simulação.

4.3 Controle *Skyhook*

Aproveitando o projeto do observador de ordem completa, optou-se por projetar o controle *skyhook*. Como o próprio nome sugere, (fazendo tradução *skyhook* = gancho no céu). A abordagem deste controle consiste em fazer a modelagem do sistema considerando a existência de um amortecedor fictício entre o céu e a massa da carroceria. Conforme pode ser visto na Figura 9.

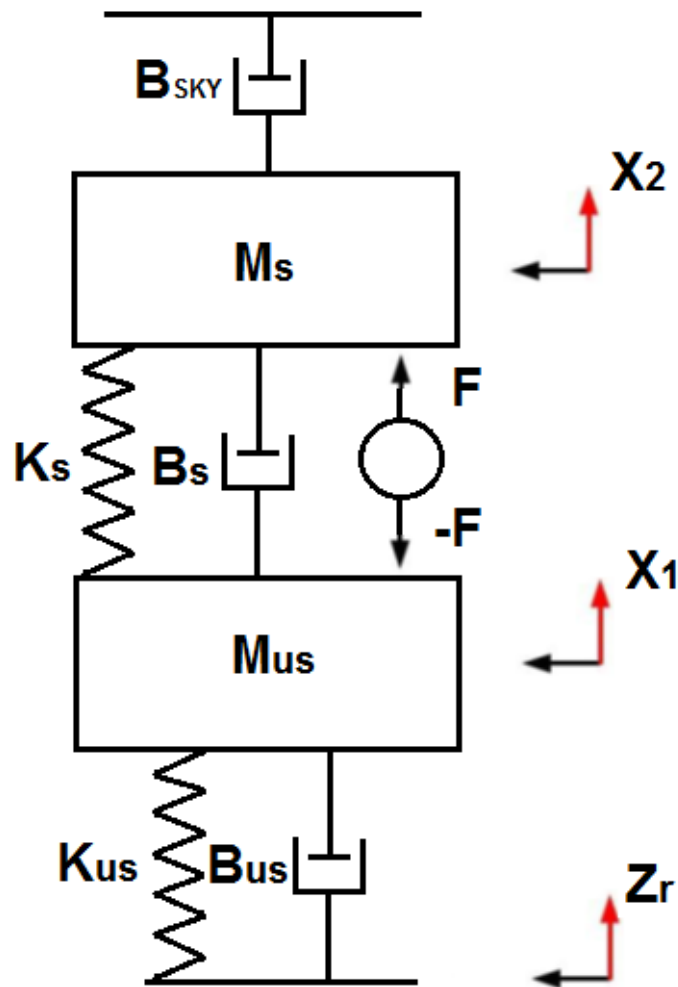


Figura 9 - Representação do controle *Skyhook*.

Segundo DE SÁ (2006) este tipo de controle é muito utilizado como forma de comparação com outros controles ou como implementação prática de suspensões ativas e semi-ativas. Aumentando o coeficiente de amortecimento do amortecedor fictício (B_{sky}) faz com que ocorra uma atenuação das oscilações na massa da carroceria, mas está melhora custa um aumento no deslocamento da massa do conjunto roda mais eixo.

No ponto de vista prático esta estratégia consiste em calcular um coeficiente de amortecimento do amortecedor fictício, a partir do coeficiente de amortecimento crítico, conforme Equação (10),

$$B_{cr} = 2\sqrt{K_s M_s}. \quad (10)$$

Pode-se definir o fator de amortecimento do amortecedor *skyhook* como a Equação (11),

$$\varepsilon_{sky} = \frac{B_{sky}}{B_{cr}} \rightarrow B_{sky} = \varepsilon_{sky} B_{cr}. \quad (11)$$

Desta maneira obtém-se a força gerada pelo amortecedor *skyhook* (F_{sky}), que esta diretamente relacionada com a velocidade da carroceria (\dot{Z}_s), Equação (12),

$$F_{sky} = 2\varepsilon_{sky}\sqrt{K_s M_s} \dot{Z}_s. \quad (12)$$

Algumas das referencias ZHANG (2009) e CHEN (2009), faz uso do controlador *skyhook* como um controle semi-ativo, o qual possui um coeficiente de amortecimento variável que depende somente da velocidade da carroceria e do conjunto eixo mais roda. A partir deste ponto DE SÁ (2006), iguala a força do amortecedor *skyhook* com a força do amortecedor da suspensão e com isto obtém um coeficiente de amortecimento variável que depende somente das velocidades da carroceria e do conjunto eixo mais roda, tornando um controle semiativo.

A proposta deste artigo é projetar um controle ativo, desta maneira, foi calculada uma força resultante entre os dois amortecedores, amortecedor fictício *skyhook* e o amortecedor da suspensão, e esta força resultante foi utilizada na realimentação do sistema, Equação (13),

$$F = B_s(\dot{Z}_{us} - \dot{Z}_s) - 2\varepsilon_{sky}\sqrt{K_s M_s} \dot{Z}_s. \quad (13)$$

O diagrama de blocos do controlador *skyhook* pode ser observado na Figura 10, onde os estados utilizados para a realimentação são $x_2 = \dot{Z}_s$ e $x_4 = \dot{Z}_{us}$.

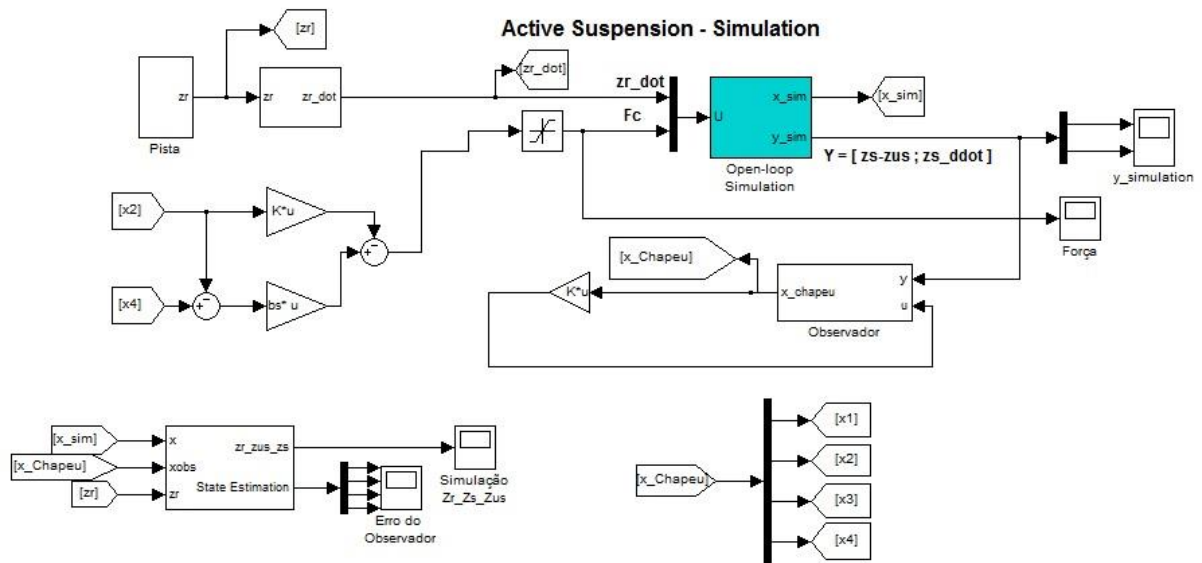


Figura 10 - Diagrama de blocos do controlador *skyhook*.

Utilizando a mesma entrada para o solo (Z_r). O resultado da simulação pode ser observado na Figura 11, nela pode-se verificar que o máximo sobre sinal da carroceria foi de 55% com um tempo de acomodação de 0,758s

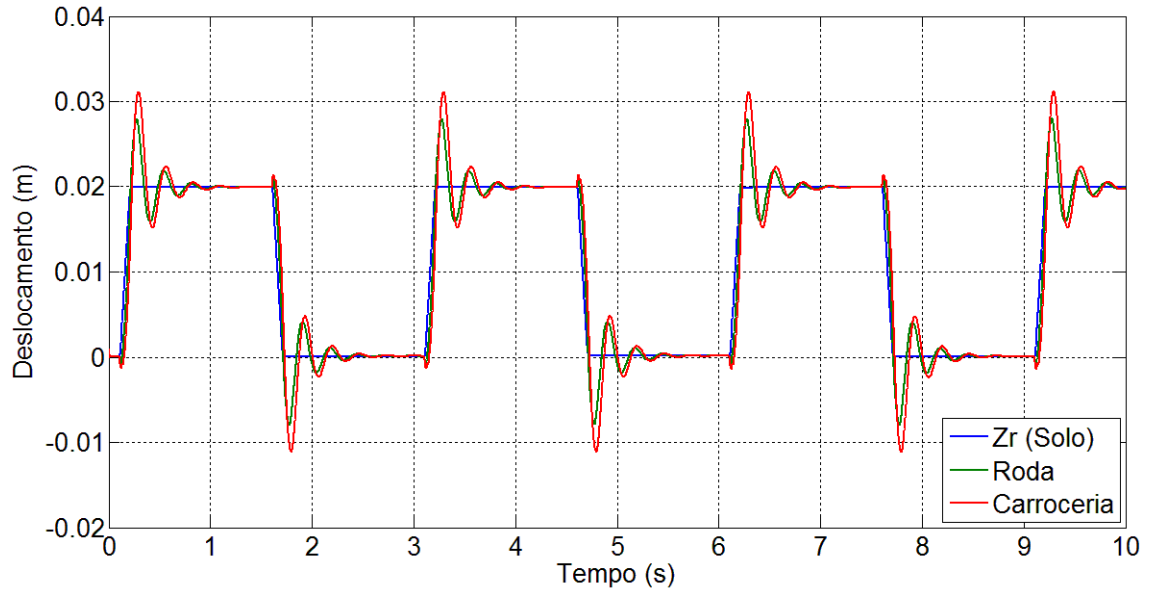


Figura 11 – Resposta com o controlador *skyhook*, simulação.

A força requisitada pelo controlador pode ser observada na Figura 12, onde a força máxima não ultrapassa a 15N, ficando dentro do range do equipamento.

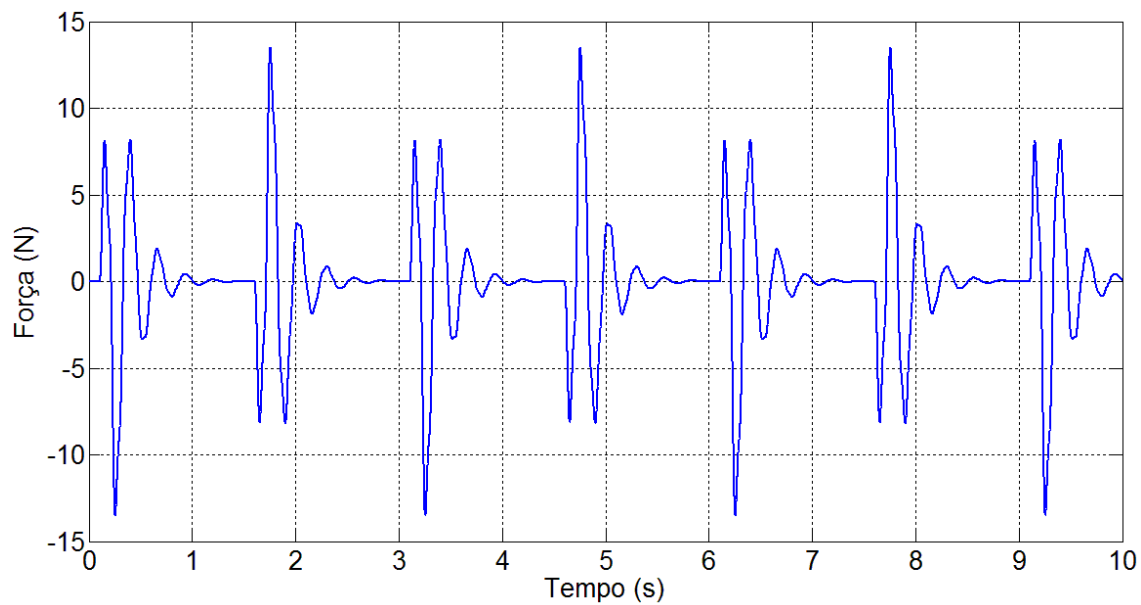


Figura 12 - Esforço do controlador *skyhook*, simulação.

4.4 Controlador *Fuzzy*

Devido a grande presença de controladores *fuzzy* em suspensões semi-ativa, principalmente as com fluidos MR, desenvolveu-se um controle do mesmo tipo para esta suspensão ativa.

De forma simplificada o controlador *fuzzy* pode ser dividido em três blocos, fuzzificação, inferência e defuzzificação. A fuzzificação transforma os valores numéricos das variáveis de entrada em funções de pertinência já a inferência determina a forma com que as regras são interpretadas, por exemplo, o tipo Mandani com conectivo **E** pode ser interpretado da seguinte maneira: **SE** [velocidade da carroceria é zero] **E** [velocidade relativa entre as massas é zero] **ENTÃO** [força é zero]. Defuzzificação faz o processo contrario da fuzzificação, mas com a variável de saída, ou seja, transforma a função de pertinência em variável de saída.

O projeto de controlador *fuzzy* é baseado em conhecimentos adquiridos do processo, desta forma o desenvolvimento do controlador *fuzzy* é específico para determinada aplicação. O projeto do controlador foi dividido em cinco etapas: 1) definição das variáveis de entrada e saída; 2) caracterização do intervalo de valores das variáveis de entrada e saída; 3) definição do conjunto de funções de pertinência; 4) definição da base de regras e 5) definição do mecanismo de inferência (PASCHOAL, 2011).

4.4.1 Definição das variáveis de entrada e saída.

De acordo com o trabalho de PASCHOAL (2011) existem três propostas adotadas de variáveis de entrada: a) velocidade absoluta da carroceria e velocidade relativa entre as massas; b) deslocamento absoluto da carroceria e deslocamento relativo entre as massas e c) velocidade e aceleração da carroceria. Neste trabalho optou-se pela primeira proposta, devido à saída do sistema ser a posição relativa entre as massas e a aceleração da carroceria, desta maneira derivando (optou-se por utilizar um filtro derivativo, pois o sistema já possuía este filtro, conforme Figura 16) e integrando respectivamente a saída do sistema obtém as variáveis de entrada do controle e não necessita o uso de observador. Como variável de saída do controlador escolheu-se a força.

4.4.2 Caracterização do intervalo de valores das variáveis de entrada e saída

Para a caracterização do intervalo das variáveis, foi realizada uma simulação do sistema em malha aberta com a força igual a zero. Assim obteve-se o seguinte range: velocidade da carroceria -0,5 a 0,5 m/s e velocidade relativa entre as massas -0,3 a 0,5 m/s. Já a força possui um range -39,2 a 39,2N, definido pelo fabricante, para não saturar o equipamento, por medida de precaução foi adotado um range menor, -30 a 30N.

4.4.3 Definição do conjunto de funções de pertinência

As variáveis de entrada e saída foram divididas em 7 funções de pertinência triangulares, onde cada uma delas recebe um nome (ou variável linguística) que são: Negativo Grande (NG), Negativo Médio (NM), Negativo Pequeno (NP), Zero (Z), Positivo Pequeno (PP), Positivo Médio (PM) e Positivo Grande (PG). As funções de pertinência podem ser vista nas Figuras 13, 14 e 15.

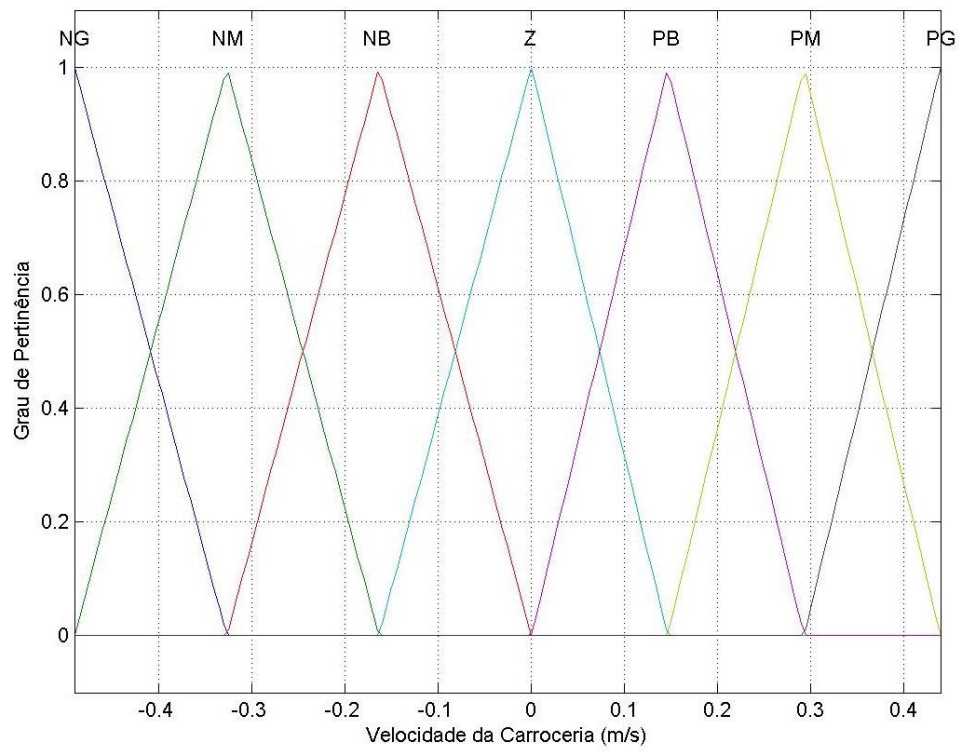


Figura 13 - Função de pertinência da variável de entrada, velocidade da carroceria.

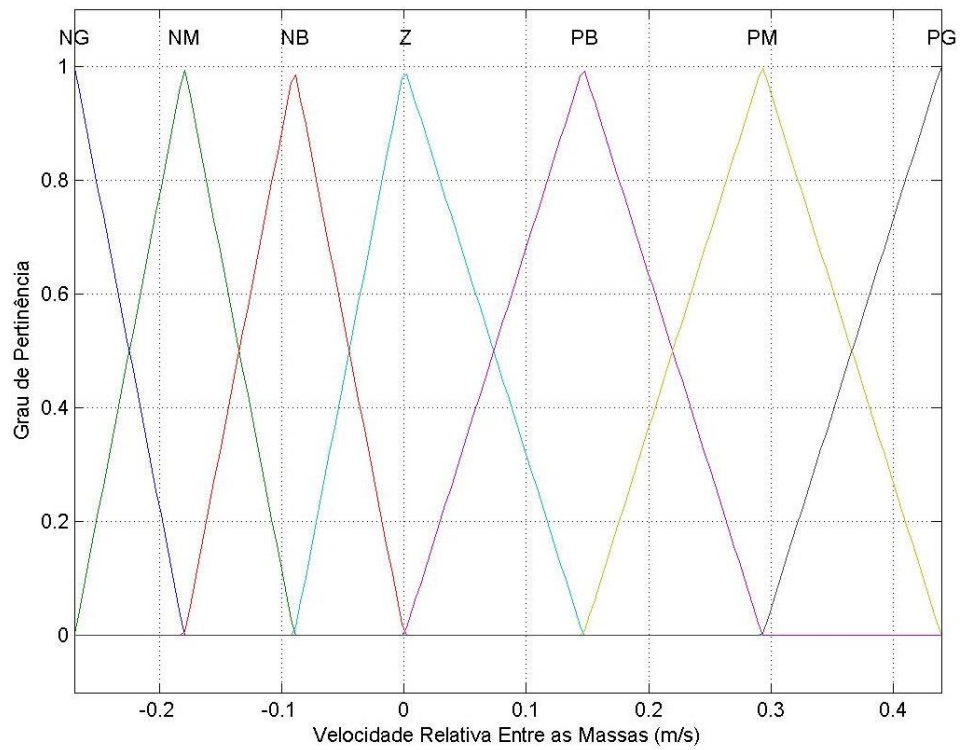


Figura 14 - Função de pertinência da variável de entrada, velocidade relativa entre as massas.

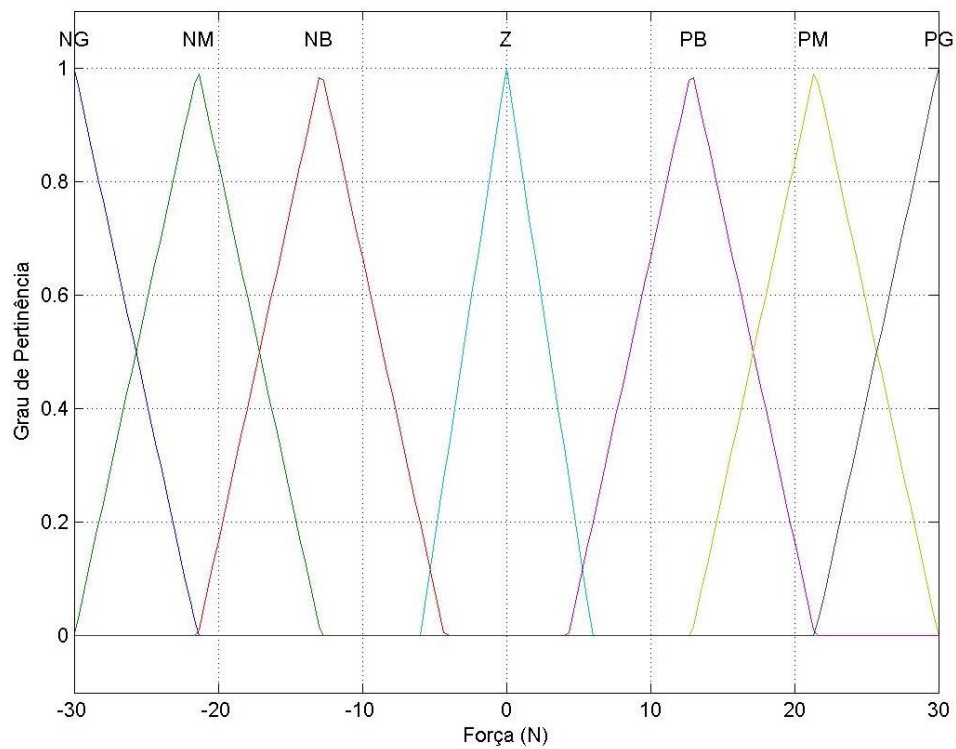


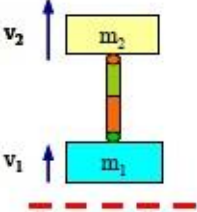

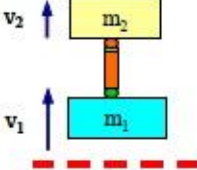

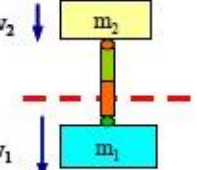

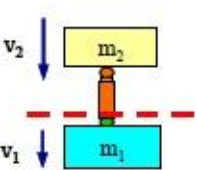

Figura 15 - Função de pertinência da variável de saída, força.

4.4.4 Definição da base de regras

Nesta parte do projeto definem-se as regras, de maneira a representar o raciocínio humano, a saída em função de cada entrada do controlador *fuzzy*. As regras foram definidas com base em controlador do tipo *on/off*.

Nesta estratégia de controle *on/off* KOO, (2003), definiu quatro possíveis situações, as quais são ilustradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Estratégia do controle on/off.

Illustrations	Sign Conventions	Direction of Damping Force Acting on m_1	Desired Damper Force Damping State
	$v_1 > 0$ $v_1 - v_2 < 0$	 Damper is in Extension Pulling up m_1 from Equilibrium	Minimum Damper Force Off-State
	$v_1 > 0$ $v_1 - v_2 > 0$	 Damper is in Compression Pushing down m_1 to Equilibrium	Maximum Damper Force On-State
	$v_1 < 0$ $v_1 - v_2 < 0$	 Damper is in Extension Pulling up m_1 to Equilibrium	Maximum Damper Force On-State
	$v_1 < 0$ $v_1 - v_2 > 0$	 Damper is in Compression Pushing down m_1 from Equilibrium	Minimum Damper Force Off-State

Fonte: (KOO, 2003).

- Massa da carroceria movendo-se para cima e as massas estão separando-se (amortecedor em extensão). Neste caso a velocidade da carroceria é positiva, assim a força de amortecimento deve ser aplicada para baixo (força negativa).
- Massa da carroceria movendo-se para cima e as massas estão aproximando-se (amortecedor em compressão). Neste caso a velocidade da carroceria também é positiva, mas como as massas estão se aproximando o ideal seria diminuir a força (força mínima).
- Massa da carroceria movendo-se para baixo e as massas estão separando-se (amortecedor em extensão). Como a velocidade relativa entre as massas é negativa e da carroceria é positiva, deve-se diminuir o amortecimento (força mínima).

- Massa da carroceria movendo-se para baixo e as massas estão aproximando-se (amortecedor em compressão). Como todas as velocidades são negativas deve se impor ao sistema uma força aplicada para cima (força positiva).

Com base nisto foi construído uma tabela com as regras propostas para o controlador *fuzzy*, que pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3 - Regras do controlador *fuzzy*.

		Entrada: velocidade relativa entre as massas						
		NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
Entrada: velocidade da carroceria	NG	PG	PG	PM	PB	Z	Z	Z
	NM	PM	PM	PB	PB	Z	Z	Z
	NP	PB	PB	PB	Z	Z	Z	Z
	Z	PM	PB	Z	Z	Z	NP	NM
	PP	Z	Z	Z	Z	NP	NP	NP
	PM	Z	Z	Z	NP	NP	NM	NM
	PG	Z	Z	Z	NP	NM	NG	NG

A Tabela 3 representa as entradas e as saídas do controlador, onde as entradas estão nos cabeçalhos e a saída no corpo. Cada célula da Tabela 3 pode ser interpretada da seguinte maneira:

SE [velocidade da carroceria é NG] **E** [velocidade relativa entre as massas é NG]
ENTÃO [força é zero].

4.4.5 Definição do mecanismo de inferência

Segundo TUSSET (2008) e SAGAZ (2003), o método mais utilizado é do tipo Mandani, que é realizada através do conectivo **E**. Este método é bastante utilizado por ser mais intuitivo, onde o conhecimento do especialista pode ser empregado diretamente ao controlador. A estratégia de defuzzificação adotada foi a de centro de área, que calcula o centróide (divisão em duas partes iguais) da área composta que é a união de todas as regras para gerar a saída *fuzzy*.

O diagrama de blocos proposto para o controlador *fuzzy*, conforme a Figura 16.

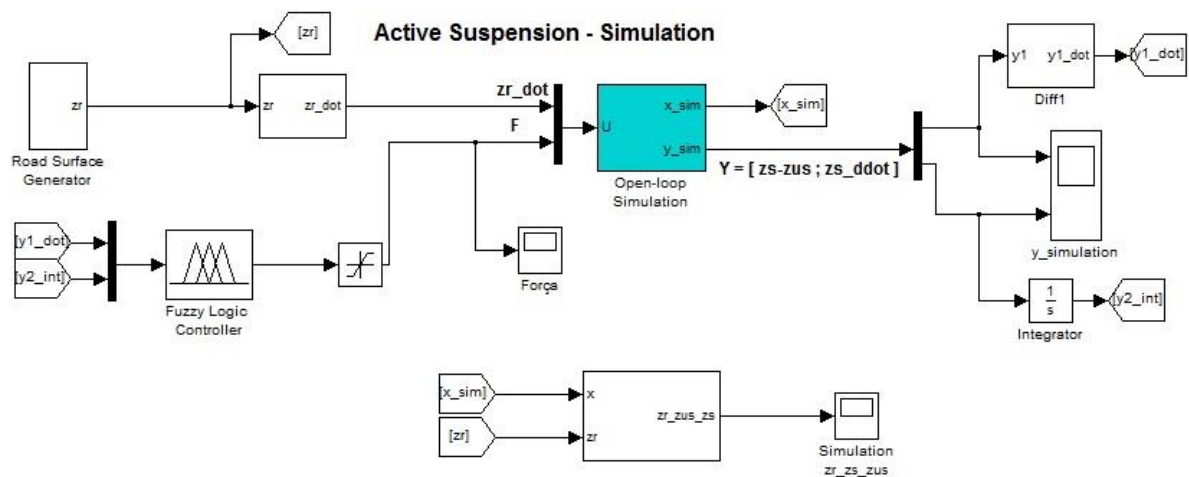


Figura 16 - Diagrama de blocos do controlador *fuzzy*.

O resultado da simulação pode ser observado na Figura 17, nela pode-se verificar que o máximo sobre sinal da carroceria foi de 21% com um tempo de acomodação de 0,243s

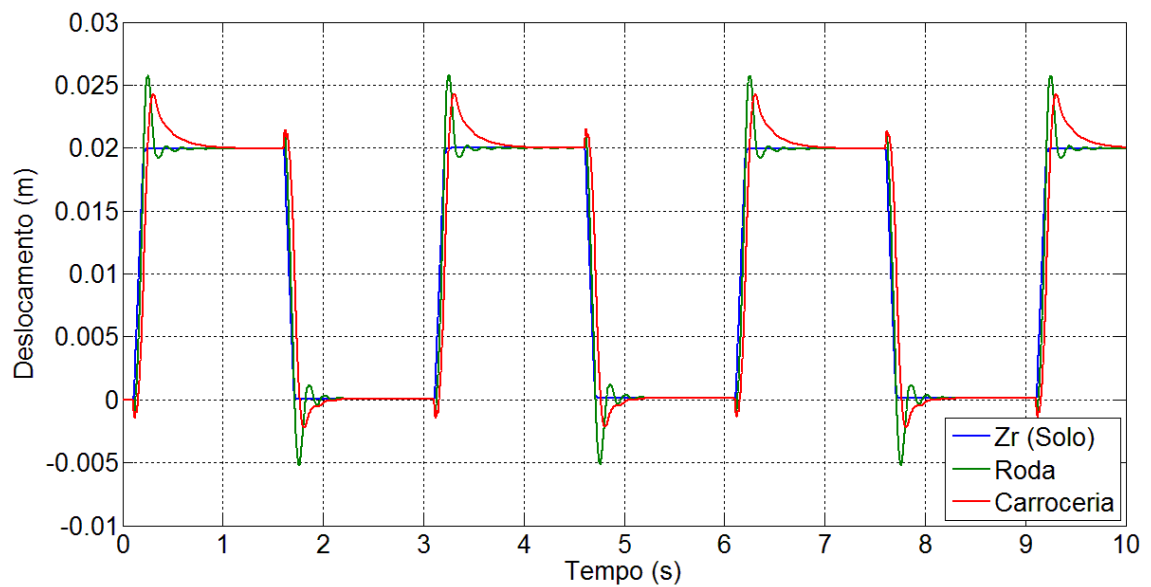


Figura 17 – Resposta com o controlador *fuzzy*, simulação.

A força requisitada pelo controlador *fuzzy* não ultrapassou a 15N, conforme Figura 18.

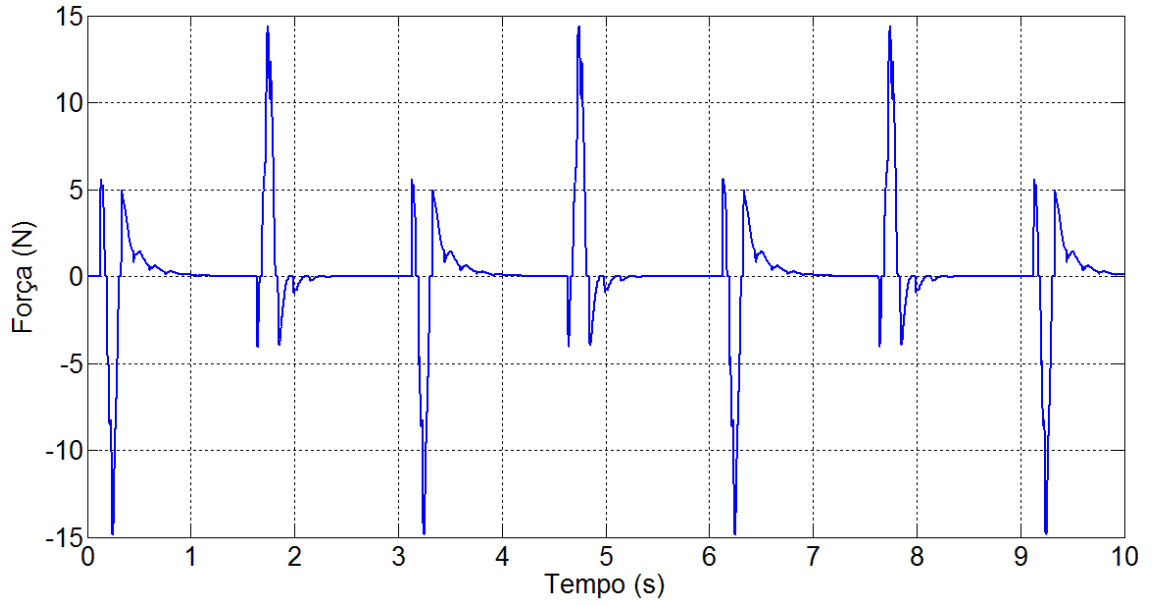


Figura 18 - Esforço do controlador *fuzzy*, simulação.

4.5 Regulador Linear Quadrático

A lei de controle proposta, com base na Equação (7), para o regulador linear quadrático é a mesma que foi proposta na realimentação de estados observados, Equação (9). Reescrevendo-a, Equação (14):

$$F(t) = -Kx(t). \quad (14)$$

Esta lei de controle tem como objetivo garantir a minimização do funcional quadrático, descrito pela Equação (15) (QUANSER, 2010),

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + F^2 R) dt, \quad (15)$$

onde Q é uma matriz diagonal semi-positiva que pondera as variáveis de estado x , já R é uma matriz positiva que determina o esforço de controle F .

A matriz K pode ser obtida conforme Equação (16). Lembrando que a matriz B usada só está com a segunda coluna, pois o sistema possui duas entradas (F e \dot{Z}_r), mas somente uma interessa (F) e a outra está sendo tratada como constante (\dot{Z}_r),

$$K = R^{-1} B^T P, \quad (16)$$

onde a matriz P pode ser obtida através da equação matricial reduzida de Riccati, Equação (17),

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0. \quad (17)$$

Como o par de matrizes A e B são controláveis, a existência e unicidade da Equação (17) são garantidas.

Os valores utilizados para as matrizes Q e R foram os que vieram junto com o equipamento da QUANSER (2010), que são:

$$Q = \begin{bmatrix} 450 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix} \text{ e } R = 0.01,$$

resolvendo a Equação (17) com os valores obtém o seguinte ganho de realimentação do regulador ótimo K :

$$K = [24,66 \quad 48,87 \quad -0,47 \quad 3,68].$$

Como o intuito é fazer uma comparação entre alguns tipos controles incluindo o proposto pelo equipamento, utilizaram-se os mesmos valores que foram obtidos no manual (QUANSER, 2010). Ressaltando que se podem obter resultados melhores para este controle LQR, como os obtidos por ZAGO *et al.* (2010), que utilizou outros valores para as matrizes Q e R com isto obteve um melhor desempenho.

O diagrama de blocos proposto pelo fabricante (QUANSER, 2010), conforme a Figura 19. Pode-se notar que para a realimentação dos estados no lugar do observador é utilizado os estados simulados (x_{sim}).

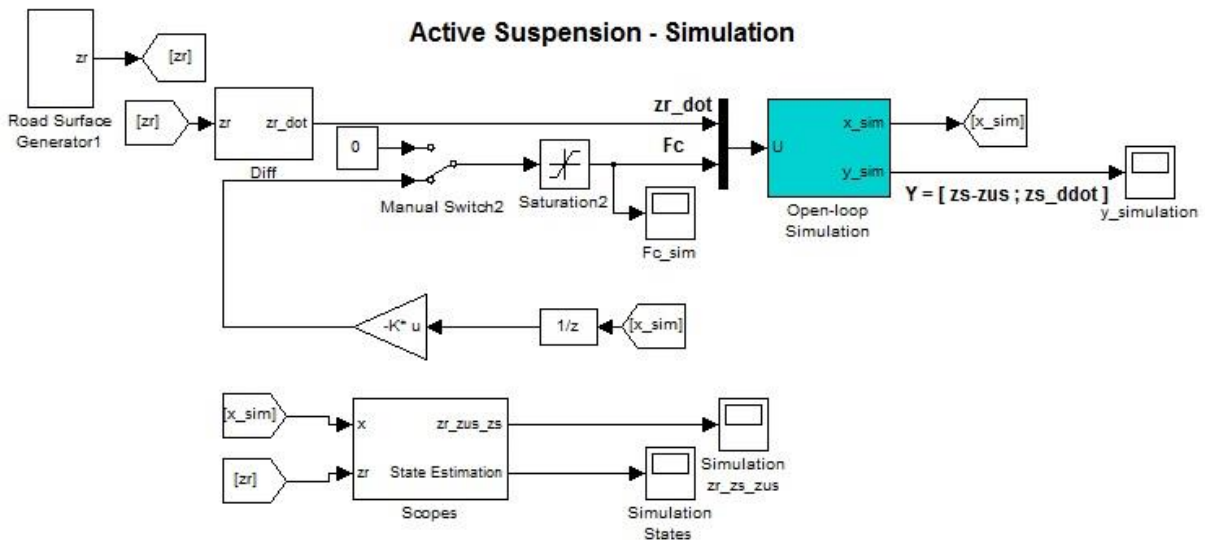


Figura 19 - Diagrama de blocos do controlador LQR.

O resultado da simulação pode ser observado na Figura 20, nela pode-se verificar que o máximo sobre sinal da carroceria foi de 17% com um tempo de acomodação de 0,571s.

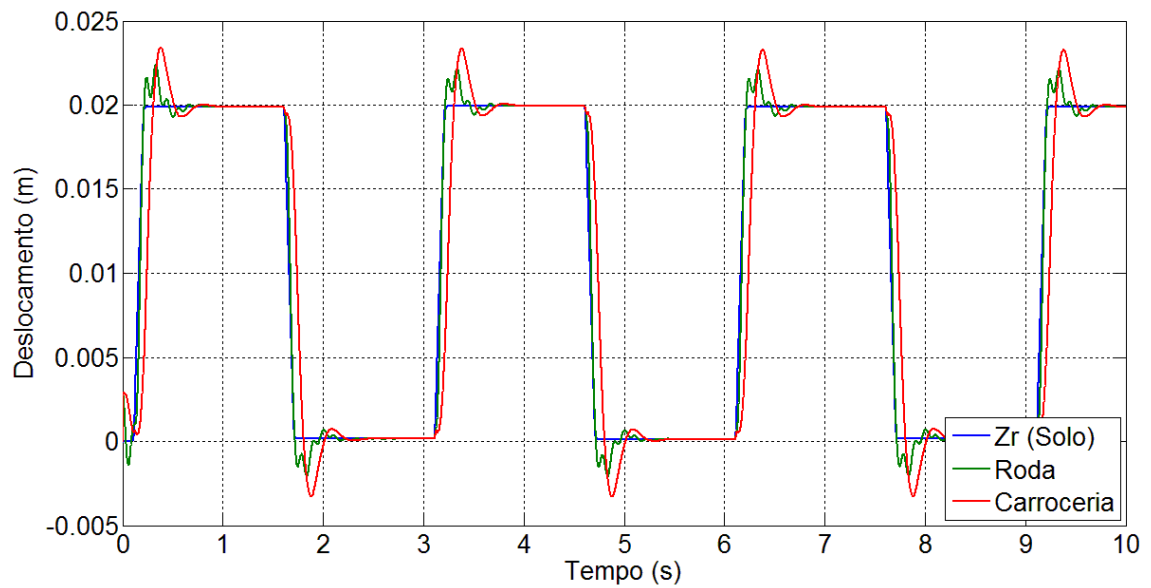


Figura 20 – Resposta com o controlador LQR, simulação.

A força do controlador LQR não ultrapassou a 10N, conforme Figura 21.

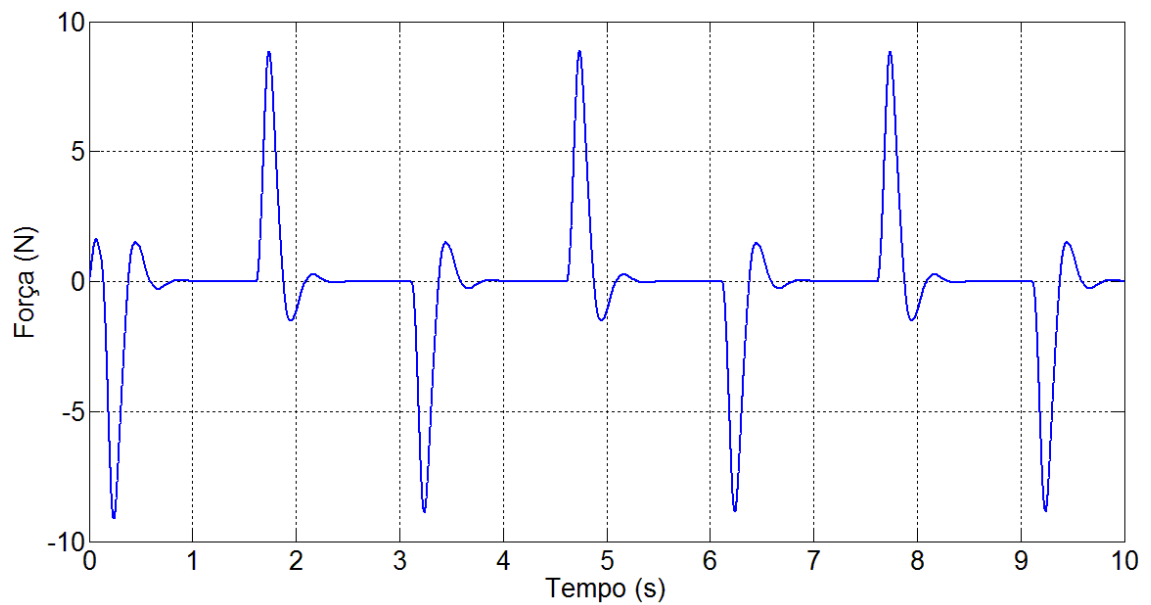


Figura 21 - Esforço do controlador LQR, simulação.

Com as simulações realizadas, pode-se concluir que o controlador LQR foi o que apresentou uma menor força, já o *skyhook* foi que apresentou uma maior força e foi aplicada por um maior tempo. De acordo com ZAGO *et al.* (2010), quando suspensões ativas são projetadas para privilegiar o conforto dos passageiros ela faz com que as oscilações na carroceria sejam as menores possíveis, não importando a oscilação da roda. As suspensões que privilegiam a

estabilidade do veículo fazem com que a roda permaneça em contato com o solo o máximo possível, permitindo a oscilação na carroceria. Com isto pode-se dizer que os controladores que melhor privilegiam o conforto dos passageiros foram os controladores *fuzzy* e o LQR, já o controlador *skyhook* foi o que apresentou o pior resultado de todos. O controlador que apresentou uma maior estabilidade foi o controlador *fuzzy*, já o que apresentou o pior resultado, novamente, foi o *skyhook*.

O *skyhook* foi o que apresentou o pior resultado em todos os quesitos, pois para o cálculo da força de realimentação da suspensão utiliza-se os dois estados observados (x_2 e x_4) com o maior erro e por ter sido adaptado este controle semi-ativo a uma suspensão ativa.

O controlador *fuzzy* foi o que apresentou uma resposta mais parecida com o LQR, com uma pequena desvantagem de possuir uma força de realimentação maior.

Ao realizar a simulação no equipamento, observou-se que a transição do sinal (de $Z_r=0.02$ m para $Z_r=0$ m) não ocorre instantaneamente, desta maneira a forma de onda quadrada fica mais parecida com uma onda trapezoidal, conforme Figura 22. Devido a isto, na simulação ocorreu um máximo sobre sinal durante a transição nos controladores por realimentação de estados, *skyhook* e *fuzzy*.

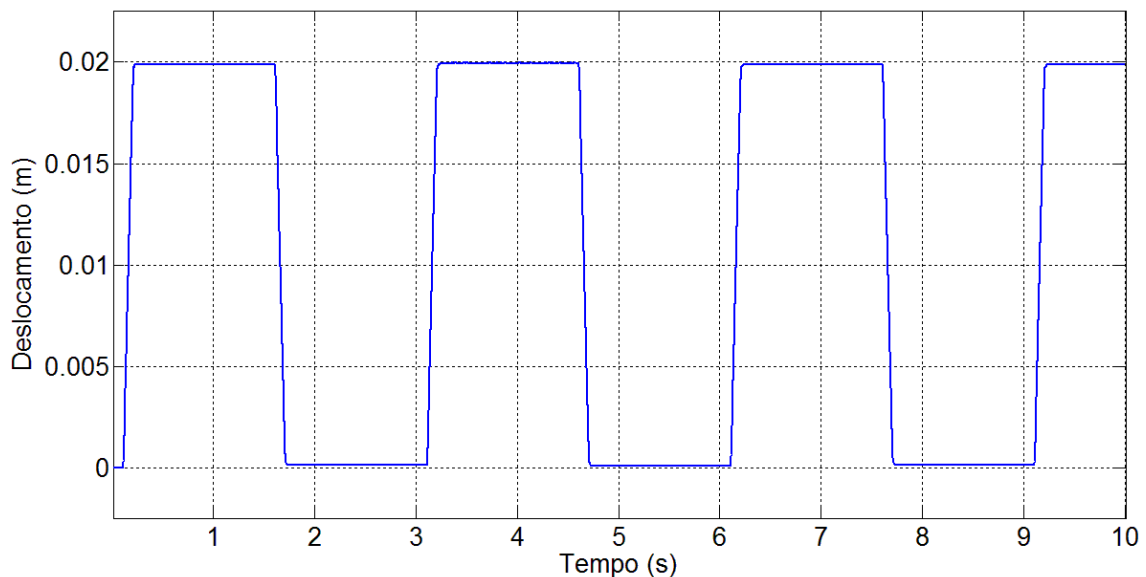


Figura 22 - Deslocamento do solo, Z_r , simulação.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Observações prévias de implementação

Para a realização da implementação no equipamento da QUANSER, foram utilizados os mesmos parâmetros e condições mostrados nas simulações.

Na implementação observou-se um erro de regime permanente para Z_{us} e Z_S , como pode ser observado na Figura 23.

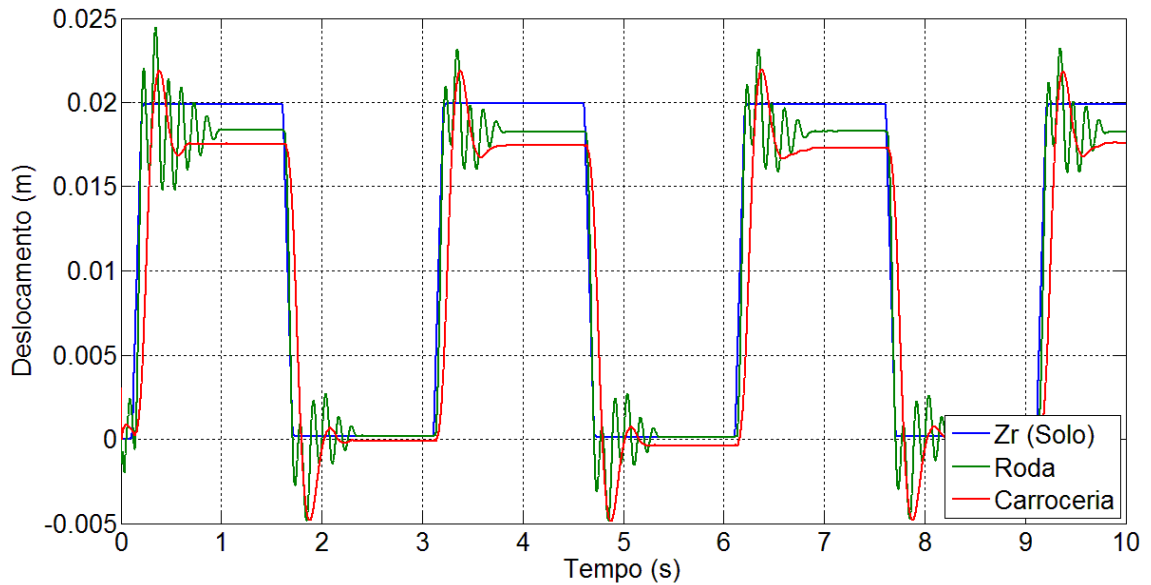


Figura 23 - Erro de regime na implementação, controle LQR.

Fazendo uma pesquisa nos artigos, encontrou-se uma resposta para este erro em regime. Segundo FERNANDES (2013), isto ocorre devido a um erro de calibração dos encoders que medem a posição do sistema e eles podem ser corrigidos de duas maneiras: calibração dos sensores ou compensação do sinal. FERNANDES (2013) sugeriu a correção no sinal que é recebido da planta, os ganhos inseridos foram 1,0840 para o sinal de Z_{us} e 1,1217 para o sinal Z_S . Fazendo a mesma análise, os ganhos foram 1.08916 para o sinal Z_{us} e 1.14068 para o sinal Z_S .

5.2 Resultado Experimental do Controlador de Realimentação de Estados

Mantendo os mesmos parâmetros, implementou-se o controlador de realimentação de estados observados. Mas notou-se que ocorreu um problema, a força de realimentação estava saturando, conforme Figura 24.

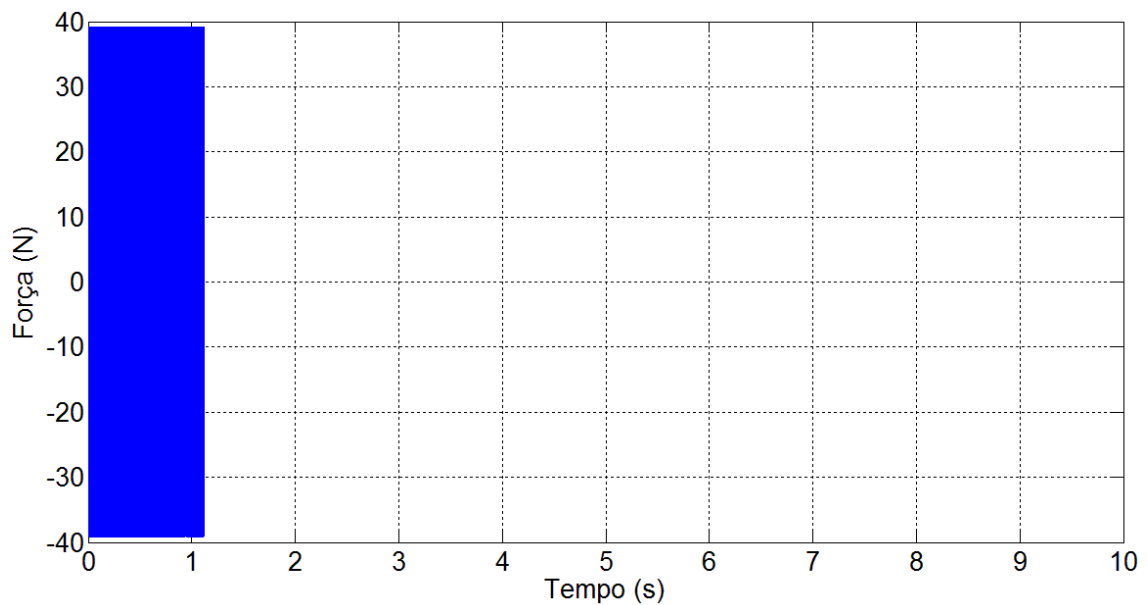


Figura 24 – Esforço do controlador por realimentação de estados saturada, implementação.

Segundo OGATA (2003), isto ocorre porque os pólos do observador estão muito longe do eixo imaginário, amplificando o ruído do sensor e que se os pólos dominantes do controlador estiverem muito afastados do eixo imaginário fará com que os elementos da matriz de ganho K de realimentação de estados se tornem grandes, fazendo com que a saída do atuador se torne grande também, de modo que haja saturação.

A solução proposta por OGATA (2003) é aproximar os pólos do eixo imaginário. Fazendo um teste rápido, dividindo o ganho do observador por cinco, observou-se uma resposta não saturada e o ganho do observador (K_e) diminuiu da ordem de 10^4 para 10^3 .

Com esta nova matriz de ganho do observador o mesmo problema não aconteceu, mas o observador apresentou um erro maior, conforme Figura 25.

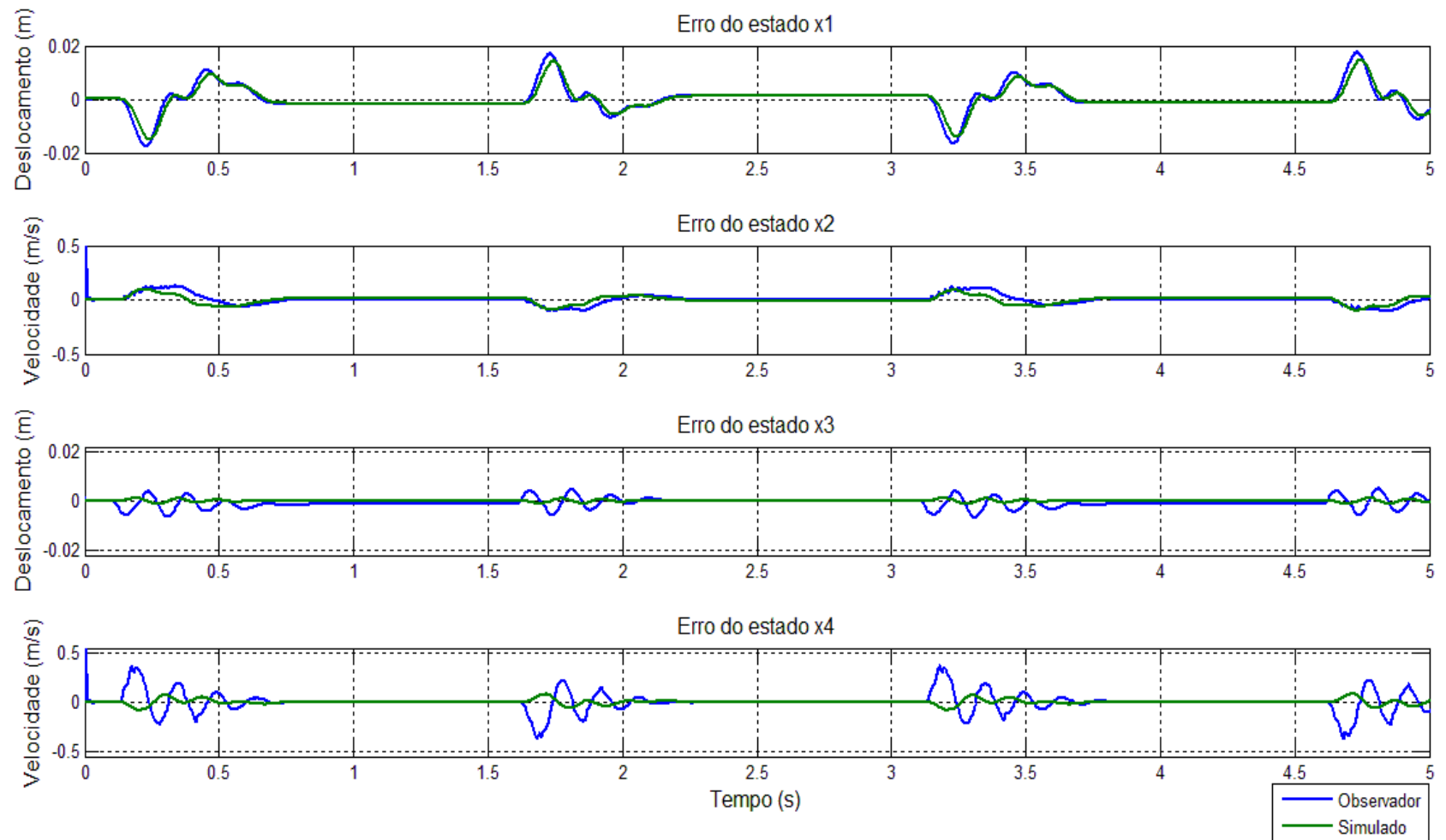


Figura 25 – Erro do observador, implementação.

Conforme Figura 25, o estado x_1 apresentou uma pequena diferença entre o estado simulado e o observado, seguido pelo estado x_2 , já os estados x_3 e x_4 foram os que apresentaram maior diferença. Os estados x_1 e x_2 apresentaram uma resposta melhor, pois eles estão disponíveis na saída do sistema e os outros estados não estão disponíveis. Esta diferença poderia ser melhorada fazendo com que a resposta do observador seja mais rápida, mas ao fazer isto o ganho do observador fica maior e com isto saturando o equipamento.

Com esta matriz de ganho nova implementou-se a realimentação de estados e os resultados obtidos podem ser observados nas Figuras 26, resposta do controlador, Figura 27, força de realimentação da planta.

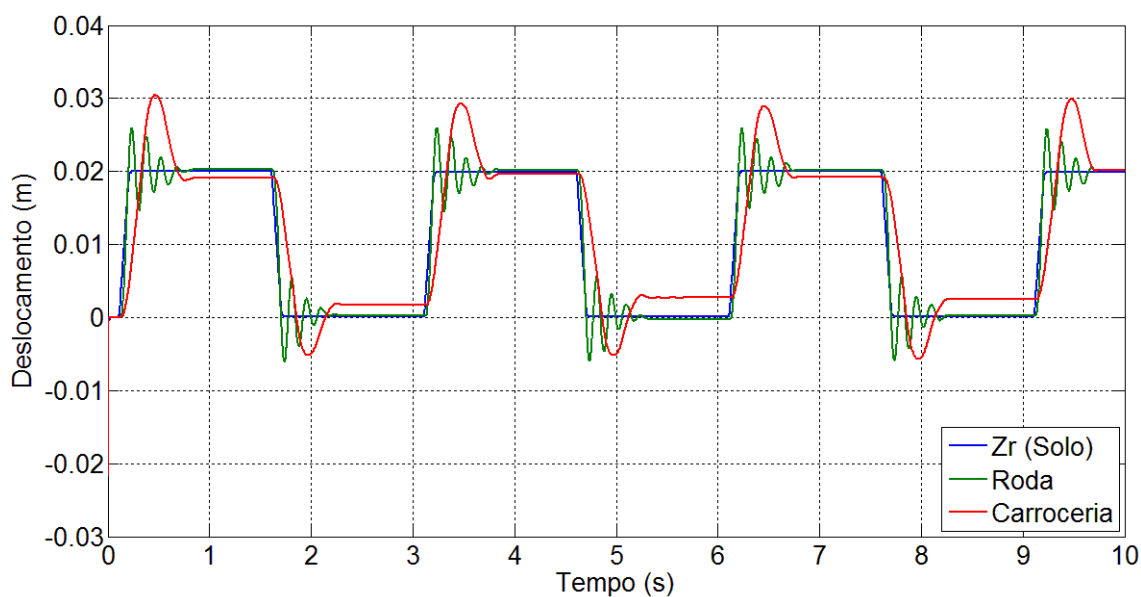


Figura 26 - Resposta com o controlador por realimentação de estado, implementação.

O tempo de acomodação foi de 0,605s e o máximo sobre sinal foi de 52%.

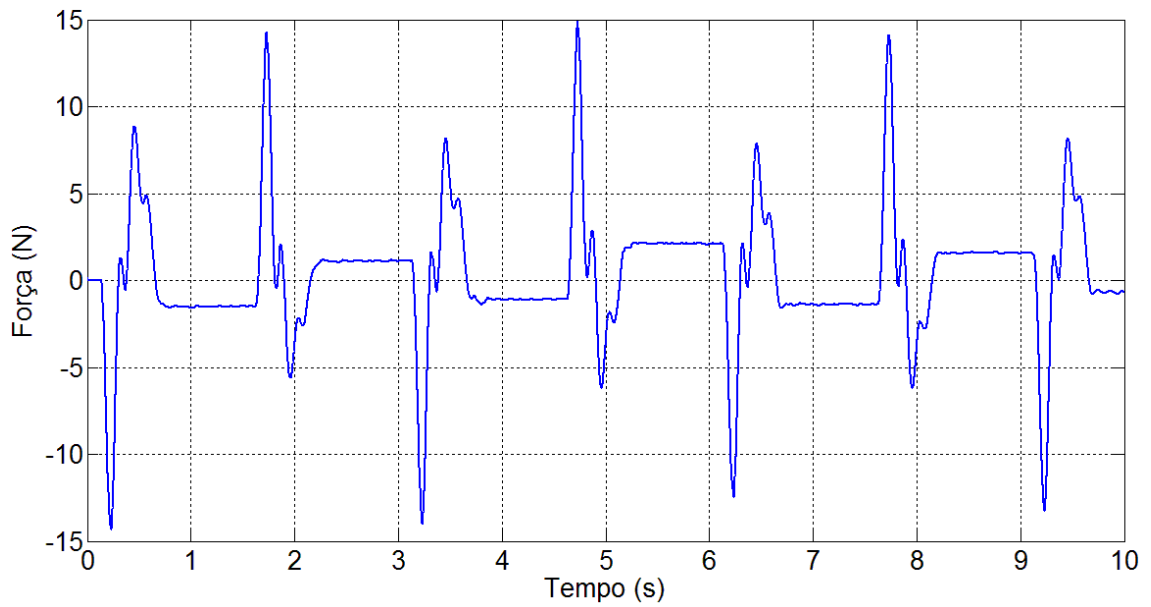


Figura 27 – Esforço do controlador por realimentação de estados, implementação.

A resposta apresentada foi inferior da simulação, devido à influência dos pólos não dominantes, pois tiveram que ser aproximados aos dominantes. O esforço do controle se manteve com a mesma amplitude, picos próximos a 15N.

5.3 Resultados Experimentais do Controlador *Skyhook*

Para o projeto do controlador *skyhook* foi utilizado à mesma matriz de ganho do observador. A resposta obtida pode ser observada nas Figuras 28 e 29. Obteve-se um máximo sobre sinal de 68% com um tempo de acomodação de 1,031s.

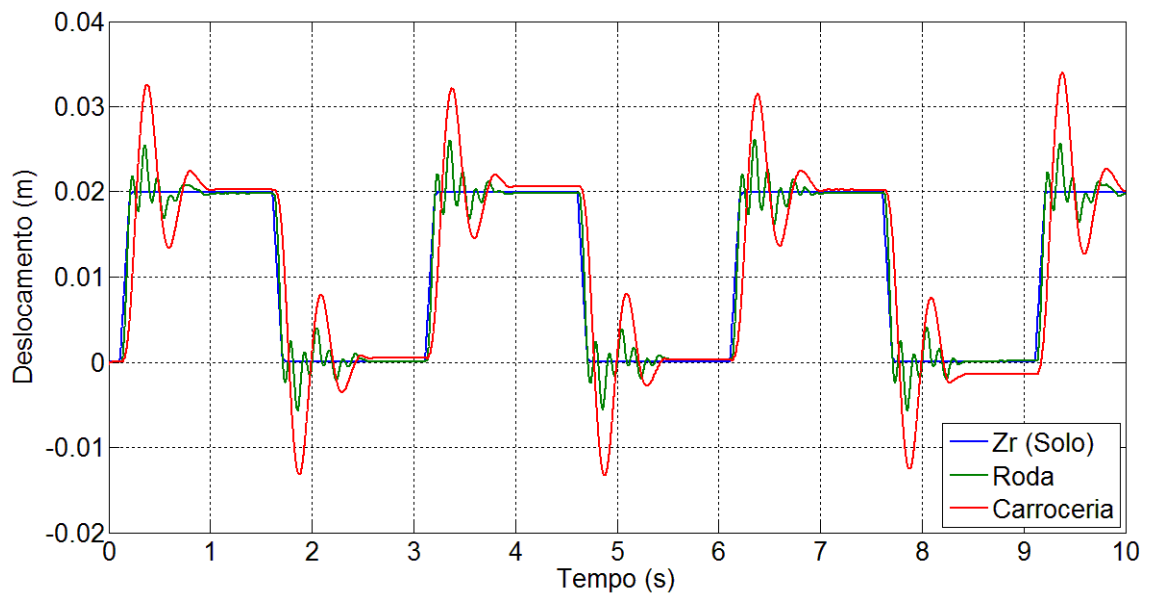


Figura 28 - Resposta com o controlador *skyhook*, implementação.

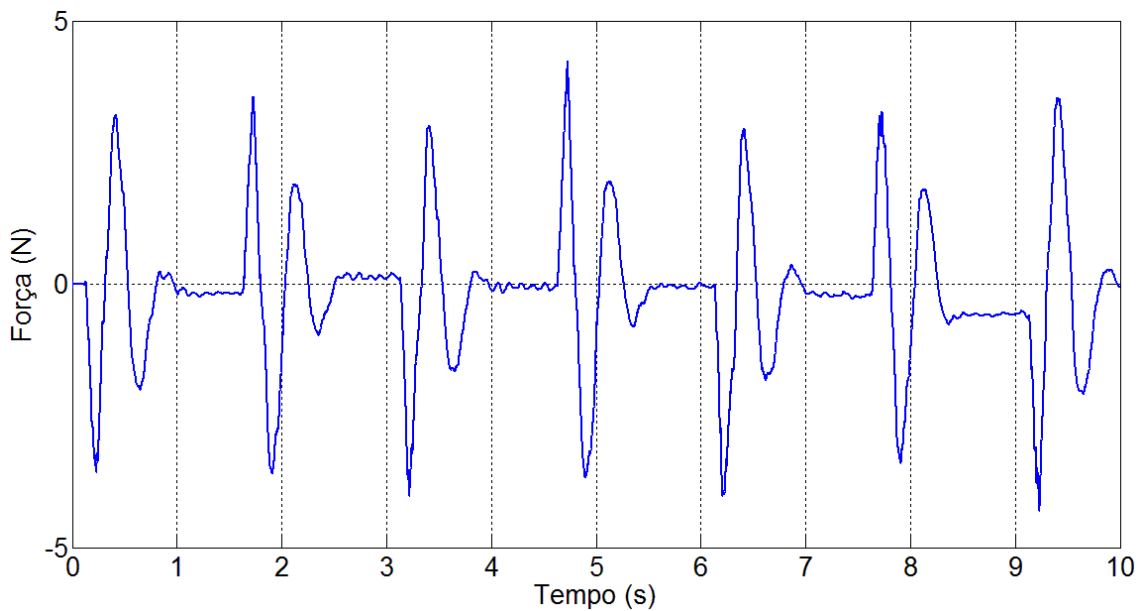


Figura 29 - Esforço do controlador *skyhook*, implementação.

Com este novo observador, o controlador *skyhook*, apresentou uma resposta menos oscilatória, mas com um sobre sinal e tempo de acomodação maior. O esforço foi menor se comparado com o simulado com o observador antigo. Do ponto de vista da dirigibilidade e conforto para os passageiros este controle seria uma péssima escolha, pois apresentou muita oscilação tanto a carroceria como a roda.

5.4 Resultados Experimentais do Controlador Fuzzy

O controlador *fuzzy* implementado no equipamento foi o mesmo utilizado na simulação e a resposta obtida pode ser observada na Figura 30.

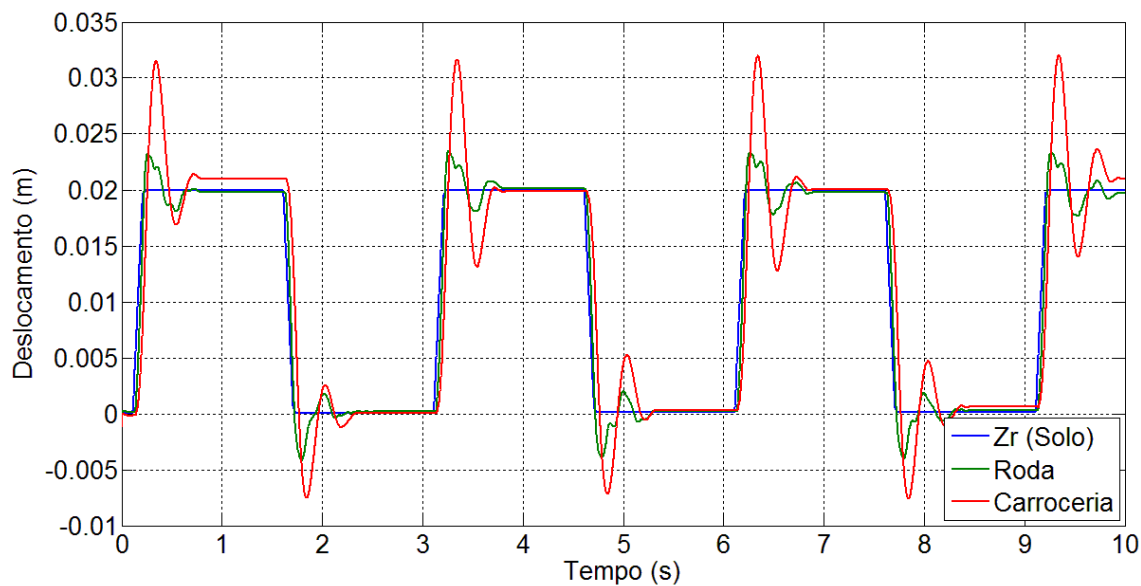


Figura 30 - Resposta com o controlador *fuzzy*, implementação.

Como pode-se notar o controlador *fuzzy* implementado apresentou uma máxima sobre sinal de 57% e um tempo de acomodação de 0,576s.

Já o esforço requerido do controlador foi menor que 15N, conforme Figura 31.

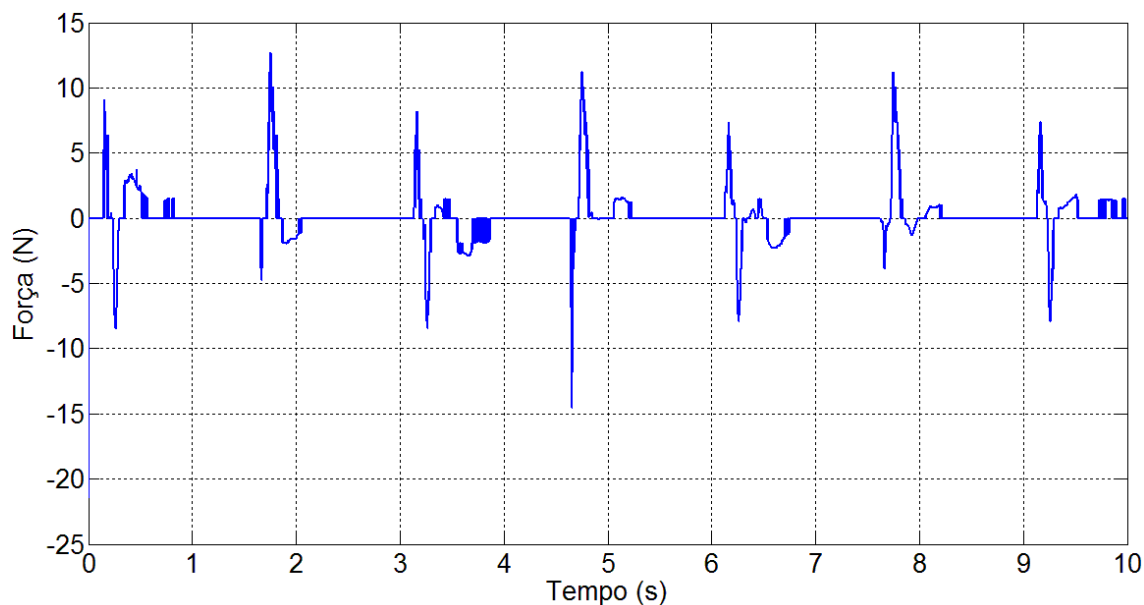


Figura 31 - Esforço do controlador *fuzzy*, implementação.

5.5 Resultados Experimentais do Controlador LQR

O controlador LQR apresentou um resultado muito próximo do simulado, conforme a Figura 32, o máximo sobre sinal da carroceria (curva vermelha) foi de 25% contra o 17% obtido com a simulação, mas sem muita oscilação garantindo o conforto para os passageiros e com um tempo de acomodação de 0,521s.

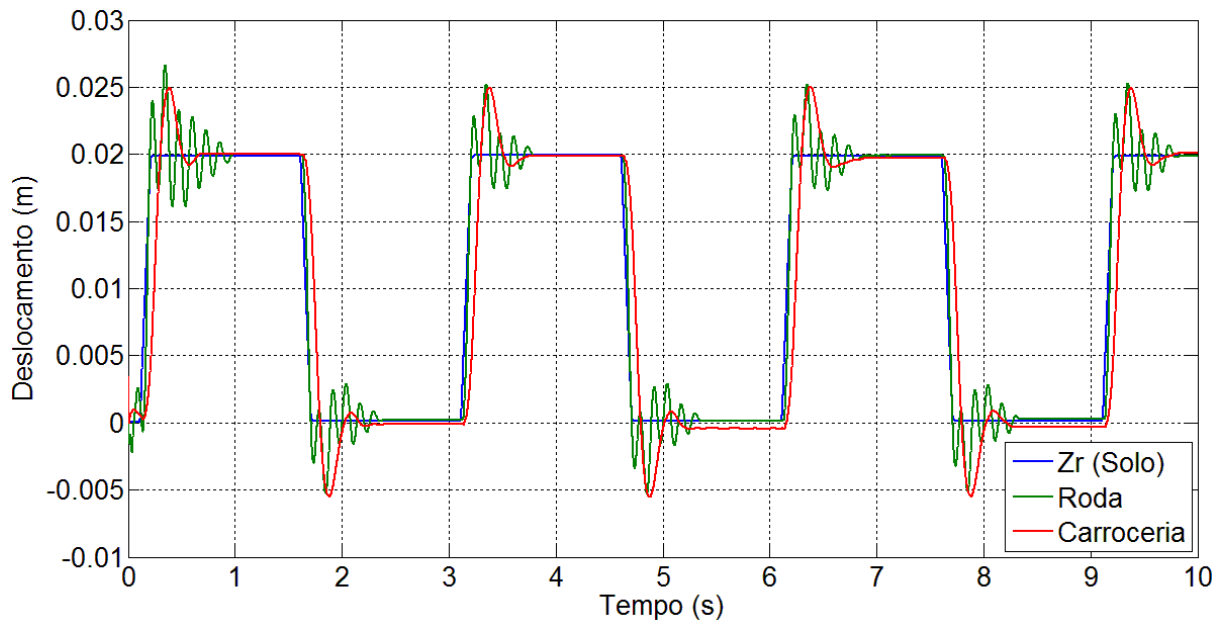


Figura 32 - Resposta com o controlador LQR, implementação.

No quesito estabilidade o controlador LQR apresentou uma resposta mais oscilatória da roda (curva em verde) se comparado com o obtido na simulação.

O esforço do controle manteve-se o mesmo da simulação não chegando a 10 N, conforme Figura 33.

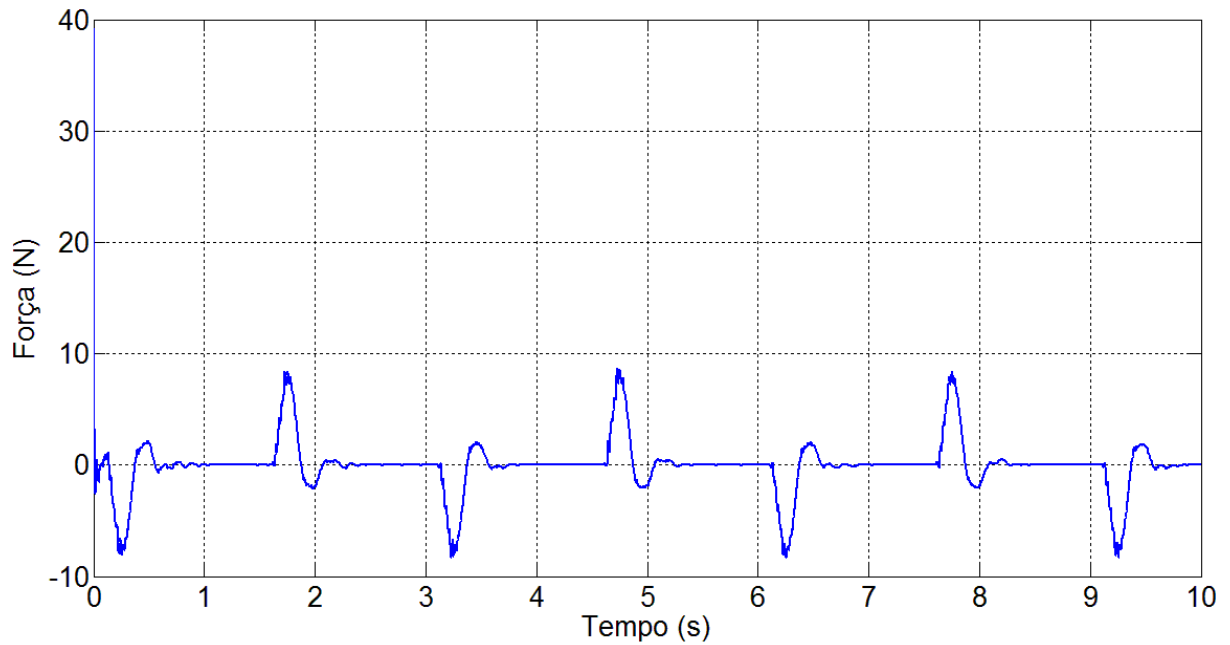


Figura 33 – Esforço do controlador LQR, implementação.

Uma explicação para estas diferenças, principalmente em relação ao máximo sobre sinal, obtidas entre as simulações e as implementações dos controladores, pode ser o ruído proveniente dos sensores que não foram levados em consideração ao escolher e elaborar o projetar dos controladores. Todos os controladores utilizam sinais que são obtidos de sensores, por exemplo, o *fuzzy*, *skyhook* e a realimentação de estados utilizam a saída $y = \begin{bmatrix} Z_s - Z_{us} \\ \ddot{Z}_s \end{bmatrix}$ do sistema (suspensão) que são obtidas por meio de sensores. Principalmente a saída \ddot{Z}_s , pois foi a que mais apresentou ruído, conforme Figura 34 que foi a saída obtida com a simulação do controlador LQR, mas todos apresentaram uma resposta muito semelhante.

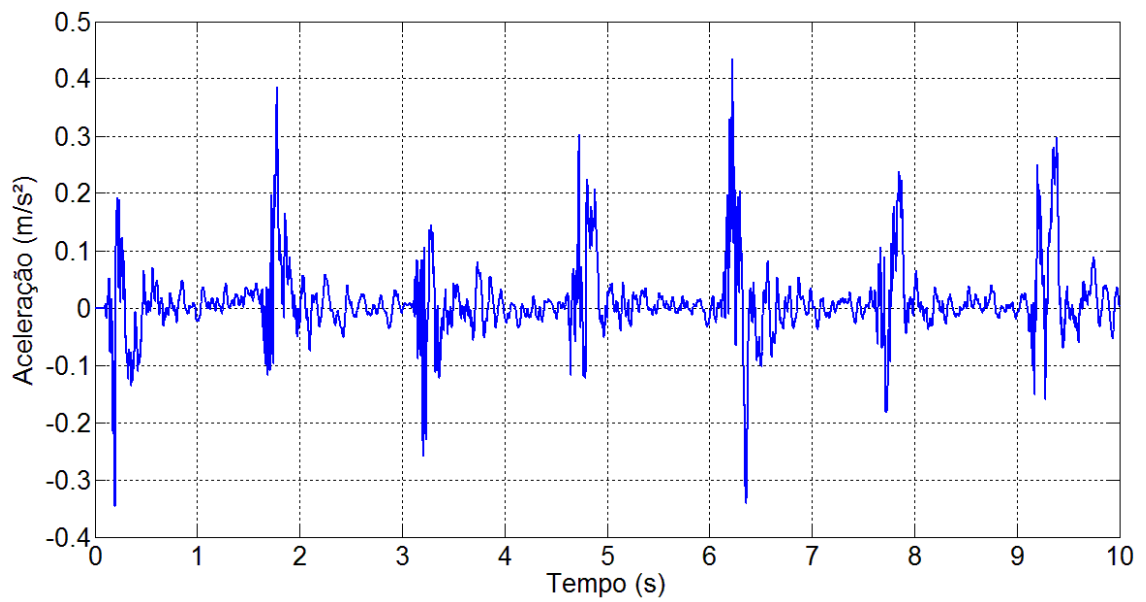


Figura 34 - Saída \ddot{Z}_s do LQR, presença de ruído.

Uma falha, que ocasionalmente ocorreu na implementação do controlador *fuzzy* foi o deslizamento do cabo ligado ao servomotor e as duas massas, conforme Figura 35. Neste caso a saída da suspensão teve que ser monitorada para poder validar a implementação.

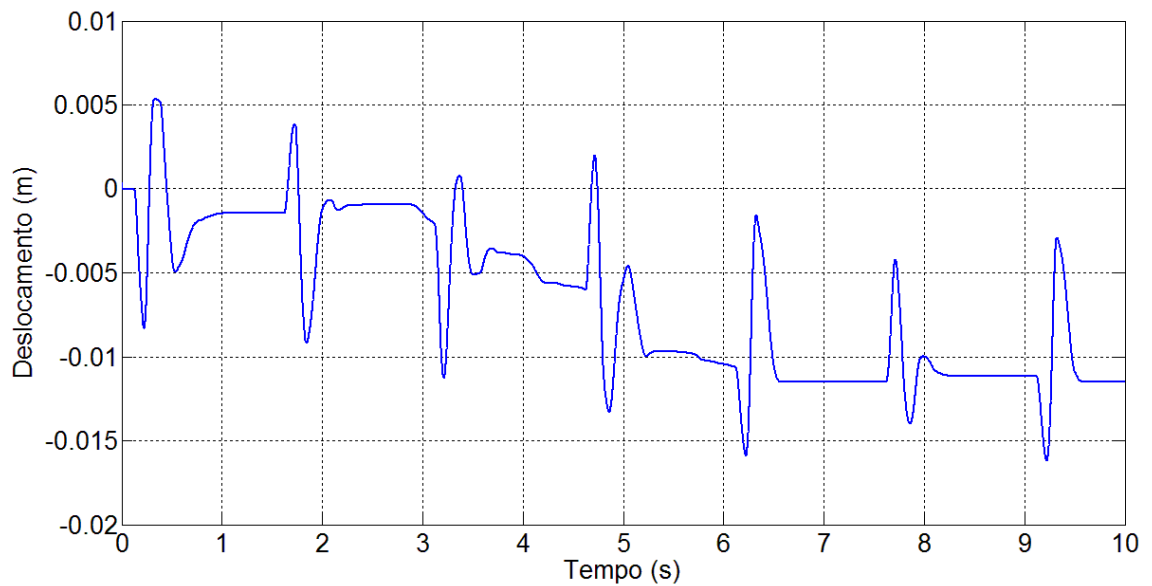


Figura 35 - Saída $(Z_s - Z_{us})$, escorregamento do cabo.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a simulação e implementação de quatro controladores, realimentação de estados observados, *skyhook*, *fuzzy* e o LQR desenvolvido pelo fabricante do equipamento (QUANSER, 2010), de uma suspensão que representa um quarto de suspensão ativa de um veículo.

As simulações e implementações foram realizadas com o intuito de comparar os resultados dos controladores *skyhook*, *fuzzy* e por realimentação de estados observados com o LQR proposto pelo fabricante do equipamento.

O controlador *fuzzy* apresentou um resultado muito próximo do LQR na simulação, mas na implementação ele apresentou máximo sobre sinal muito elevado, conforme Tabela 4, devido à presença de ruído, já o tempo de acomodação se manteve o mesmo.

O controlador *skyhook* foi o que apresentou a maior diferença entre a simulação e a implementação, isto se deve ao fato da matriz de ganhos do observador ter sido alterada para não saturar o equipamento, por outro lado, a realimentação de estados observados apresentou um tempo de acomodação menor com esta nova matriz de ganhos do observador, mas teve um aumento no máximo sobre sinal.

Tabela 4 - Comparação entre os controladores.

	Simulação		Implementação	
	Mp [%]	ts [s]	Mp [%]	ts [s]
Realimentação de estados observados	35	0,617	52	0,605
<i>Skyhook</i>	55	0,758	68	1,031
<i>Fuzzy</i>	21	0,576	57	0,576
LQR	17	0,571	25	0,521

O controlador LQR apresentou um menor máximo sobre sinal de todos, veja Tabela 4, um tempo de acomodação baixo com um esforço de controle intermediário dentre todos os controladores, mas não se mostrou muito eficiente quanto ao quesito dirigibilidade já que a roda apresentou uma resposta muito oscilatória.

Os controladores por realimentação de estado e o *skyhook* não apresentaram uma resposta próxima ao controlador LQR, pois apresentaram um máximo sobre sinal e tempo de acomodação

superior, conforme Tabela 4, mas serviram como uma excelente ferramenta para a compreensão do funcionamento da suspensão que facilitaram o desenvolvimento do controlador *fuzzy*. Os principais problemas destes dois controladores foram às limitações impostas pelo equipamento, onde o ganho do observador não pode ser muito elevado, fazendo com que o observador não apresente uma resposta rápida o suficiente.

O controlador *fuzzy* apresentou uma resposta muito parecida com o LQR, pois ambos tiveram um aumento no máximo sobre sinal, mas praticamente mantiveram o tempo de acomodação o mesmo. Considerando a complexidade do projeto, já que o LQR é muito mais complexo de se desenvolver comparado com o *fuzzy*, pois o controlador *fuzzy* é mais intuitivo e para desenvolvê-lo basta entender o funcionamento da suspensão, para obter uma resposta satisfatória.

Nas simulações e implementações foram aplicados controladores independentemente um do outro, porém, em trabalhos futuros pode-se tentar fazer uma aplicação com mais de um controlador utilizando em conjunto os controladores *skyhook* e *fuzzy*, onde o controlador *fuzzy* determinaria o coeficiente de amortecimento mais adequado para o *skyhook*.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, E., G. **Inovação Tecnológica na Indústria Automobilística: características e evolução recente**. 2008. In: Economia e Sociedade, vol. 7, p. 429-461. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ecos/v17n3/04.pdf>>. Acessado em 04 /02 /2013.

CHEN, Y. **Skyhook Surface Sliding Mode Control on Semi-Active Vehicle Suspension System for Ride Comfort Enhancement**. 2009. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/eng/>>. Acessado em 28/10/2013.

CORRÊA, J., L. **Comportamento Dinâmico de um Veículo Implementado com Suspensões Ativas**. 2011. 104 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CRIVELLARO, C. **Controle Robusto de Suspensão Semi-Ativa para Caminhonetes Utilizando Amortecedores Magneto-Reológicos**. 2008. 439 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

DE SÁ, R., L. **Controle Skyhook Aplicado a um Modelo de Suspensão Hidropneumática para Carretas Agrícolas**. 2006. 108 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

FERNANDES, U., B. **Controle com Estrutura Variável e Modos Deslizantes Aplicado em Sistema de Suspensão Ativa**. 2013. 78 f.. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

KOO, J., H. **Using Magneto-Rheological Dampers in Semiactive Tuned Vibration Absorbers to Control Structural Vibrations**. 2003. 140 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2003.

MAIA, R., H. **Análise de Sensibilidade Aplicada a Estudos de Conforto Vibracional em Automóveis**. 2002. 151 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003 783 p.

PASCHOAL, E., F. **Controle Semi-Ativo de Vibrações Usando Lógica Nebulosa e Fluido Magnetoreológico**. 2011. 117 f.. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

PICADO, R., M. **Controle Semi-Ativo em Suspensões Automotivas**. 1998. 100 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

QUANSER INNOVATE EDUCATE. **Active Suspension Control Laboratory: Instructor Manual**. Revision 2.0. Quanser Innovate Educate 48 f.. 2010. (Document Number, 845).

RILL, G. **Vehicle Dynamics: Lectures Notes For University of Applied Sciences**. 2003. Disponível em: < <http://homepages.fh-regensburg.de/%7Erig39165/>>. Acessado em 05 /04 /2013.

SAGAZ, F., S., G. **Sistema Baseado em Lógica Nebulosa Aplicado ao Controle dos Níveis de Um Processo Multivariável com Quatro Tanques**. 2003. 91 f.. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2003.

STUTZ, L., T. **Síntese e análise de uma suspensão semi-ativa magneto reológica baseada na abordagem de controle com estrutura variável**. 2005. 173 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SZÁSZI, I., GÁSPÁR, P., BOKOR, J. **Nonlinear Active Suspension Modelling Using Linear Parameter Varying Approach**. 2002. In: Proceedings of the 10th IEEE mediterranean conference on control and automation - MED2002. Lisboa.

TUSSET, A., M. **Controle Ótimo Aplicado em Modelo de Suspensão Veicular Não-Linear Controlada Através de Amortecedor Magneto-Reológico**. 2008. 156 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

VANNUCCI, S., N. **Variable damping suspension with electronic control**. In: FISITA CONGRESS. 1992. The vehicle and the environment: technical papers. London: Automotive Technology Serving Society, Londres, 1992.

ZAGO, F., RAFIKOV, M., VALDIERO, A., C., RASIA, L., A. 2010. **Modelagem Matemática e Simulações Computacionais do Controle Ótimo de Um Quarto do Sistema de Suspensão Automotiva**. Disponível em: <<http://www.sbmac.org.br/dincon/trabalhos/PDF/student/68661.pdf>>. Acessado em 12/02/2014.

ZHANG, H., WINNER, H., LI, W. **Comparison Between Skyhook and Minimax Control Strategies for Semi-active Suspension System**. 2009. Disponível em: <<http://waset.org/>>. Acessado em 28/10/2013.

SZÁSZI, I., GÁSPÁR, P., BOKOR, J. **Nonlinear Active Suspension Modelling Using Linear Parameter Varying Approach**. 2002. In: Proceedings of the 10th IEEE mediterranean conference on control and automation - MED2002. Lisboa.

8 ANEXO A

```
clear
clc
CONTROLLER_TYPE = 'Open_Loop'; % Open-loop system
%CONTROLLER_TYPE = 'LQR_GUI_TUNING'; % calls Matlab-based GUI for interactive
LQR tuning
%CONTROLLER_TYPE = 'LQG_GUI_TUNING_With_Full_Obs'; % calls Matlab-based GUI
for interactive LQG tuning
%CONTROLLER_TYPE = 'MANUAL'; % controller design: manual mode
% ##### END OF USER-DEFINED CONTROLLER DESIGN #####
[ A, B, C, D, K, L, Aobs, Bobs, Cobs ] = ASP_ABCD_MATRICES(CONTROLLER_TYPE);
ms = 2.45; %massa da carroceria
ks = 900; %constante de amortecimento da mola
bs=7.5; %coeficiente de amortecimento do amortecedor
mp=0.1; %maximo sobre sinal
ts=0.5; %tempo de acomodação
%Pólos desejados
xi=sqrt(((log(mp))^2)/((log(mp))^2+pi^2));
omega_n=4/(xi*ts);
p1=-xi*omega_n+j*omega_n*sqrt(1-xi^2);
p2=-xi*omega_n-j*omega_n*sqrt(1-xi^2);
p3=2*real(p1);
p4=p3;
Polos_do_Controlador=[p1 p2 p3 p4]
%Obtenção da matriz de ganho do controlador
K=acker(A,B(:,2),Polos_do_Controlador)
PolosMalhaFechada=eig(A-B(:,2)*K)
%Fazendo com que os pólos do observador sejam mais rápidos que do
%controlador
ftd1=3;
ftd2=3;
ftd3=5;
ftd4=5;
Polos_do_observador=[ftd1*(p1) ftd2*(p2) ftd3*(p3) ftd4*(p4)]
%Pólos do observador
Ke= place(A',C',(Polos_do_observador)')
%Matrizes do observador
Aobs= A;
Bobs=B(:,2);
Cobs=C;
Dobs=D(5:6,2);
%Coeficiente de amortecimento do skyhook
Bsky= 2*xi*(sqrt(ks*ms));
```