

ESTUDO E SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE SUSPENSÃO ATIVA PARA MODELOS DE UM QUARTO DE CARRO E CARRO INTEIRO

STUDY AND SIMULATION OF ACTIVE SUSPENSION CONTROLLERS FOR QUARTER-CAR MODELS AND FULL-CAR MODELS

Rafael Marcili Laganaro, Diego Colón - Campus de Sorocaba - UNESP - Engenharia de Controle e Automação - raf.lag@gmail.com - bolsista FAPESP.

Palavras chaves: simulação; modelagem matemática; controle linear; controle não linear; suspensão ativa.

Keywords: simulation; mathematical modeling; linear control; nonlinear control; active suspension.

1. Introdução

Os sistemas de suspensão convencionais (passivos), compostos de molas, amortecedores e pneus, são utilizados há bastante tempo em automóveis, com a finalidade de amortecer vibrações nos chassis quando as rodas recebem deslocamentos verticais abruptos, ocasionados por buracos, lombadas e outras irregularidades da pista. Entretanto, um sistema de amortecimento passivo não pode satisfazer os requisitos de uma viagem confortável e conferir uma boa estabilidade ao carro simultaneamente (Kashtiban *et al.*, 2009).

Para melhorar o desempenho das suspensões convencionais, em termos de conforto e segurança, a suspensão ativa vem sendo aperfeiçoada nas últimas décadas. Sua diferença em relação à suspensão passiva está na inclusão de amortecedores ativos, os quais têm a capacidade de alterar as características das suas forças de atuação, como por exemplo, com modificações na pressão dos fluidos dos mesmos. Um sistema de controle em malha fechada é implementado a fim de controlar a força do amortecedor em diferentes condições e irregularidades da pista. Existem dois tipos de suspensão ativa: dependente e independente. Em suspensões independentes, cada roda move-se individualmente sem afetar as outras rodas. Em suspensões dependentes, o movimento de uma roda afeta as demais, geralmente por causa da interconexão dos atuadores ativos devido à estrutura do próprio automóvel (Wang *et al.*, 2009).

2. Fundamentação Teórica E Objetivos

2.1. Fundamentação Teórica

Modelos de um quarto de carro são freqüentemente utilizados para analisar suspensões, pois são mais simples e ainda assim apresentam muitas características do modelo completo. A figura 1 mostra o modelo utilizado em (Lin e Kanellakopoulos, 1997), o qual representa tanto uma suspensão passiva quanto uma suspensão ativa.

A representação em espaço de estados da suspensão ativa é:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{M_c} [K_a(x_1 - x_3) + C_a(x_2 - x_4) - F_a]$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{M_r} [K_a(x_1 - x_3) + C_a(x_2 - x_4) - K_p(x_3 - d) - F_a]$$

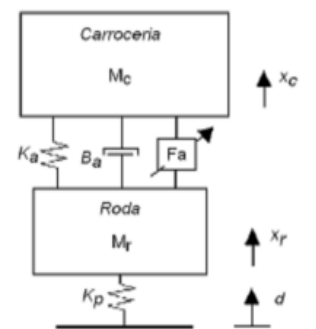


Figura 1. Modelo de 1/4 de

na qual M_c e M_r são as massas da carroceria e da roda, respectivamente, K_a e B_a são os coeficientes da mola e do amortecedor da suspensão convencional e K_p é coeficiente elástico do pneu. As variáveis de estado são $x_1 = x_c$ (posição da carroceria), $x_2 = \dot{x}_c$ (velocidade vertical da carroceria), $x_3 = x_r$ (posição vertical da roda) e $x_4 = \dot{x}_r$ (velocidade vertical da roda). A força F_a tem valor zero no sistema sem realimentação (suspensão passiva).

Com a finalidade de tirar o deslocamento da carroceria e garantir sua estabilidade, utiliza-se o controle em malha fechada, também tirado de (Lin e Kanellakopoulos, 1997), cuja equação da força F_a de realimentação é dada por $F_a = K_a(x_1 - x_3) + C_a(x_2 - x_4) - c_1x_1 - c_2x_2$ de modo que a escolha conveniente das constantes c_1 e c_2 estabiliza a carroceria.

Para estudar a estabilidade da *dinâmica interna* (parte da dinâmica não observável pelos sensores colocados na carroceria), segundo (Slotine, 1991) deve-se determinar a estabilidade da *dinâmica zero*, que é encontrada fazendo-se $x_1 = x_2 = 0$ na equação, o que novamente resulta em um sistema oscilatório. Um controle melhor envolveria medida da posição vertical da roda, como é o caso da diferença $x_1 - x_3$, para diminuir o curso da suspensão (diferença entre posição da carroceria e da roda). Para evitar a dinâmica zero oscilatória, poderia se escolher uma versão filtrada de x_3 dada por $\bar{x}_3 = \varepsilon x_3 / (s + \varepsilon)$ (para maiores detalhes vide (Lin e Kanellakopoulos, 1997)). A força aplicada seria então dada por $F_a = M_c [-(c_2 + c_1)z_2 + (c_1^2 - 1 + c_1\varepsilon)z_1 - \varepsilon(x_2 - x_4)] + K_a(x_1 - x_3) + C_a(x_2 - x_4)$.

O modelo de um quarto de suspensão de um veículo pode ser expandido para o modelo de suspensão completo, que consiste de uma plataforma rígida, conectada aos modelos de suspensão de um quarto (acima). Dessa forma, além dos movimentos verticais das rodas, a plataforma também sofrerá dois tipos de rotações: rolamento e arremesso. Um modelo de suspensão completa é mostrado na figura 2, baseado em (Darus, 2008).

Neste projeto, optou-se por utilizar o toolbox SimMechanics do software Matlab/Simulink para fazer a modelagem do sistema de suspensão ativa completa, baseado na figura 2. A vantagem de se utilizar este toolbox é que se pode construir modelos computacionais mais precisos, que de outro modo resultariam em equações matemáticas muito complicadas para serem tratadas. (Mathworks, 2011).

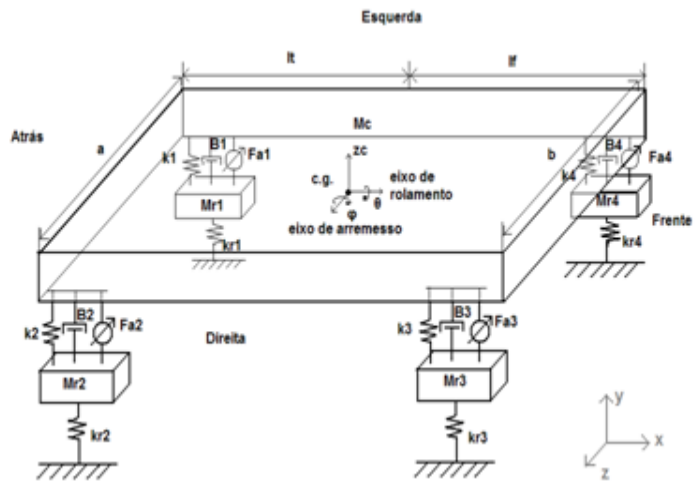


Figura 2. Sistema de suspensão completa com plataforma rígida.

2.2 Objetivos

- Estudo e simulação de modelos de suspensão ativa, baseados no controle de apenas um quarto do veículo;
- Modelagem de suspensão completa no SimMechanics composta por uma plataforma rígida e quatro amortecedores acoplados com os controles independentes estudados no item anterior;

- Simulação para validação dos controladores independentes de um quarto de suspensão, agora acoplados no modelo de plataforma, inserindo distúrbios da pista mais próximos de situações reais;

3 Materiais e Metodologia

Os materiais utilizados neste projeto foram: software MATLAB/Simulink. A metodologia desenvolvida consistiu inicialmente em fazer simulações dos modelos de suspensão ativa de um quarto de veículo, utilizando-se como distúrbio sinais que representam uma lombada, a fim de comparar a suspensão ativa e a passiva.

Implementou-se, então, o modelo de suspensão completa (plataforma rígida) com o toolbox SimMechanics, baseando-se no esquema da figura 3. Em cada um dos movimentos desejados para medição, colocaram-se blocos de sensores, para transformar o movimento em um sinal conhecido do Matlab. Em seguida, utilizando também blocos de atuadores, pôde-se fechar a malha com os controladores de um quarto de suspensão em cada uma das rodas do modelo de plataforma rígida.

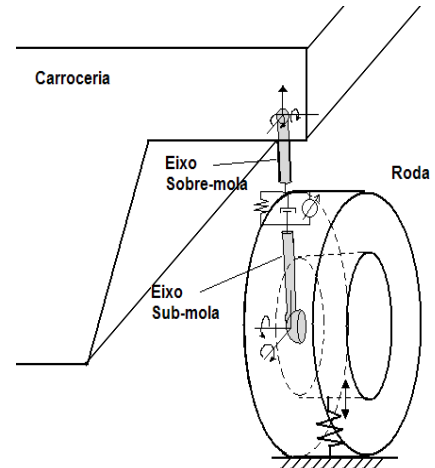
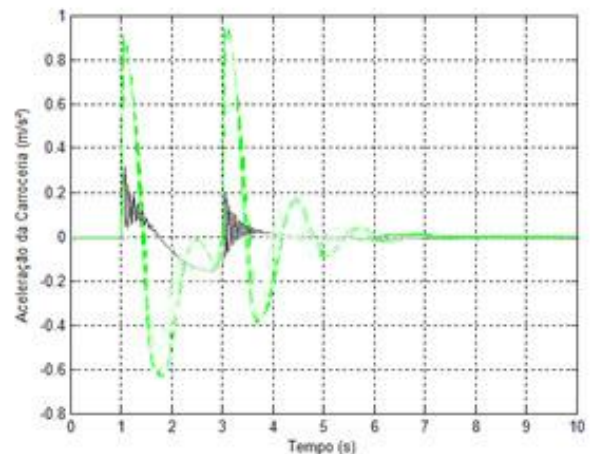
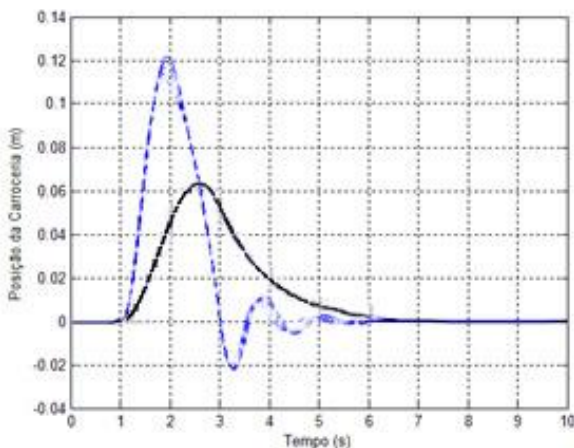


Figura 3. Esquema de suspensão utilizado para permitir os movimentos de rotação da

4 Resultados e Discussões



Os resultados das simulações do modelo de um quarto de suspensão passiva e ativa, posição e aceleração, para o mesmo distúrbio que simula uma lombada, estão nas figuras 4 e 5. Através destes resultados, pode-se notar que o deslocamento vertical da carroceria no modelo de suspensão ativa é menor e mais suave, o que resulta na diminuição da aceleração vertical, e conseqüente aumento do conforto dos passageiros.

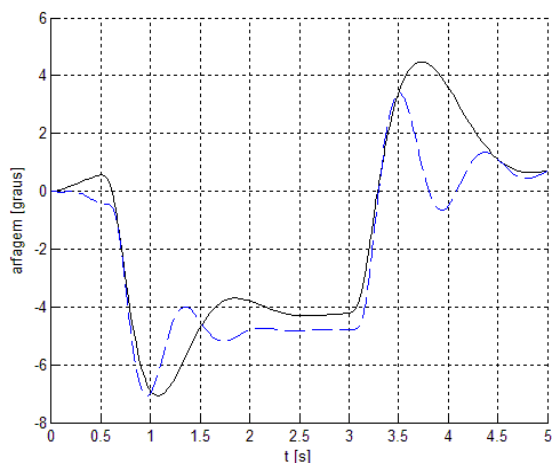


Figura 4. Posição da carroceria de um quarto de suspensão

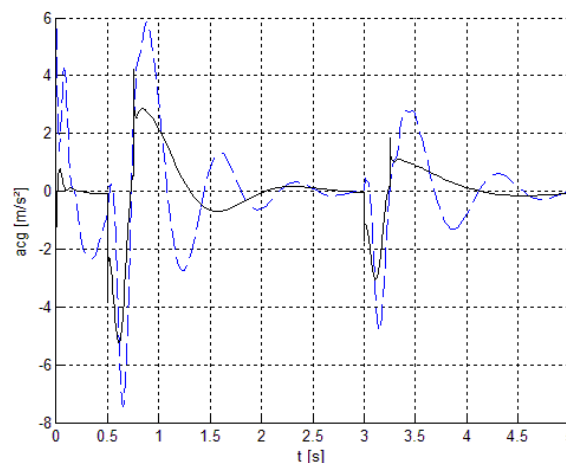


Figura 5. Aceleração da carroceria de um quarto de suspensão

distúrbio de lombada, só que agora o sinal chega primeiro nas rodas dianteiras e depois nas rodas traseiras. Os resultados das simulações tanto para a suspensão passiva completa, curvas em azul dos gráficos, quanto para a suspensão ativa completa, curvas em preto do gráfico, estão mostrados nas figuras 6, 7, 8 e 9, que correspondem ao deslocamento vertical do centro de gravidade da plataforma, aceleração linear do centro de gravidade, variação angular da carroceria em torno do eixo de arremesso (ver figura 2) e aceleração angular da carroceria em torno do eixo de arremesso.

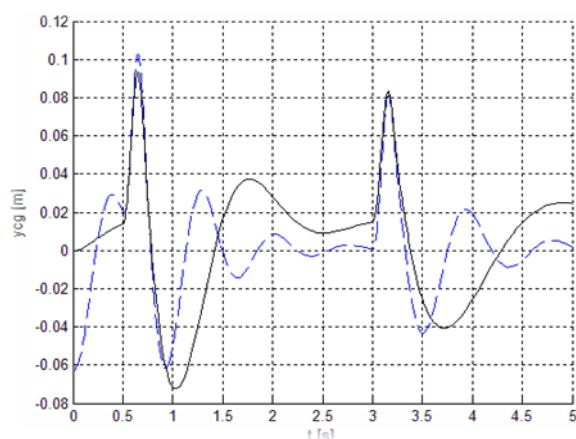


Figura 8. Variação angular em torno do eixo de arfagem.

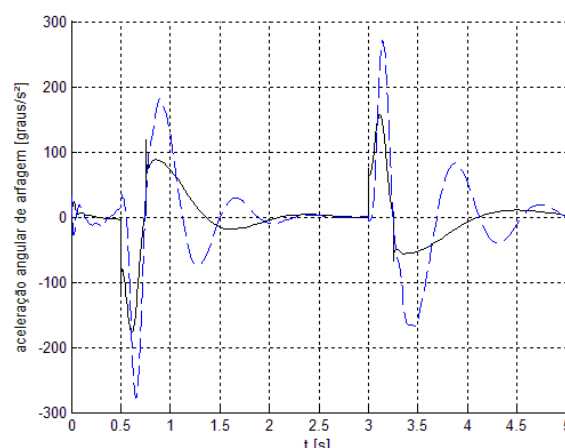


Figura 9. Aceleração angular em torno do eixo de arfagem.

Figura 6. Deslocamento vertical do centro de gravidade

Figura 7. Aceleração vertical do centro de gravidade da

ação à suspensão passiva, diminuindo as acelerações do centro de gravidade e de rotação de arfagem. Mesmo sendo projetado para um quarto de suspensão, esse controlador fez diminuir a aceleração angular da carroceria, mostrando que pode ser implementado em um sistema mais próximo do real, como é este implementado no SimMechanics. É importante notar que a diminuição das acelerações traz maior conforto ao passageiro, visto que nosso corpo é sensível justamente às acelerações.

5 Conclusões

O modelo implementado no SimMechanics dinamicamente está mais próximo de um veículo real, e além de sofrer deslocamento verticais, também sofre rotações na plataforma, de

arfagem e rolamento. O controlador projetado para apenas um quarto de veículo também se mostrou eficaz no modelo de suspensão completa, diminuindo a aceleração vertical e também a aceleração de arremesso, apesar de não ser projetado para compensar acelerações rotacionais.

Referências Bibliográficas

Kashtiban, A. M., Pourqorbon, N., Alizadeh, G., Hasanzadeh, I. **Nonlinear Optimal Control of a Half Car Active Suspension**, Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, 2009.

Wang, L. Zhang, N., Du, H. **Design and Experimental Investigation of Demand Dependent Active Suspension for Vehicle Rollover Control**, 48th IEEE Joint Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2009.

Lin J. S. & Kanellakopoulos, I., **Nonlinear Design of Active Suspensions**, IEEE Control System Magazine, vol 17, pag. 45-49, 1997.

Slotine, J. E. & Li, W. **Applied Nonlinear Control**, *Prentice Hall*, 1991.

Darus, R. B. **Modeling and Control of Active Suspension for a Full Car Model**, University Teknologi Malaysia, May 2008.

Mathworks Inc. **Tutorial for SimMechanics**, The Mathworks, 2011