
Taubaté, 12/07/14 a 15/07/15

TTEM 001/15

SISTEMA DE SUSPENSÃO PNEUMÁTICA ELETRÔNICO

SYSTEM OF ELECTRONIC PNEUMATIC SUSPENSION

Signatários:

- Carlos André Prado Firmino¹
- Willian Martins¹
- Prof. Dr. José Rubens de Camargo – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Francisco José Grandinetti – Universidade de Taubaté/FEG-UNESP
- Prof. Dr. José Rui Camargo – Universidade de Taubaté

Finalidade: Contribuir para o melhor entendimento do sistema de suspensão pneumática eletrônico
Duração: 12 meses

1 - Alunos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté - UNITAU

Palavras chave: Suspensão ativa, Suspensão semi-ativa, Suspensão passiva.

Resumo. Devido a grande procura do mercado automobilística, visando à redução de choques e vibrações transmitidos ao veículo e passageiros, a suspensão ativa oferece um maior conforto e uma maior rentabilidade ao veículo devido ao sistema de controle nela embutido. Um sistema completamente ativo pode controlar os movimentos do veículo realmente forçando a suspensão a se estender em respostas a medidas já tomadas e por movimentos antecipados do veículo. O que existe de realmente sofisticado são os sensores e o sistema operacional. Objetivo desse trabalho é contribuir para o melhor entendimento desse sistema e, se possível, o aprimoramento de um sistema de suspensão pneumática eletrônica. Para isso, serão avaliados dados de fabricantes e também um modelo físico para se obter resultados reais para estudarmos seus pontos positivos e negativos.

1. INTRODUÇÃO

O propósito das suspensões veiculares é suportar adequadamente o chassi do veículo, manter o contato dos pneus com o solo e gerenciar o compromisso entre dirigibilidade e conforto dos passageiros. Por exemplo, carros esportivos terão suspensões mais rígidas para melhor dirigibilidade e para que a execução de manobras agressivas seja possível, enquanto que as suspensões utilizadas nos carros de passeio serão mais macias para aumento do conforto.

Suspensões passivas possuem desempenho limitado, pois seus componentes apenas dissipam energia de forma pré-determinada. A adição de componentes ativos nas suspensões veiculares melhora substancialmente as características de dirigibilidade, desempenho e conforto.

De forma geral, os seguintes equipamentos são requeridos em um sistema de suspensão veicular ativa:

- *Atuadores* – elementos responsáveis pelo emprego de força e movimento mecânico requeridos;
- *Sensores* – dispositivos utilizados na medição dos parâmetros necessários para o controle, como acelerações e o movimento relativo entre o eixo da roda e a carroceria do veículo;
- *Unidade de processamento* – responsável pela interpretação das informações provenientes dos sensores e pela determinação do sinal de controle;

A busca de tecnologia para fornecer aos veículos melhores características de dirigibilidade e desempenho induz à utilização de sistemas de controle capazes de gerenciar, de maneira eficaz, vários aspectos da dinâmica veicular. Esta busca traz a necessidade do conhecimento do sistema a ser controlado, para tanto, a utilização da modelagem matemática é fator essencial no aprimoramento de novos projetos para um melhor conforto ao usuário de veículos automotores. Consideramos um modelo de um quarto de veículo, sujeito a excitações randômicas, utilizou-se a teoria de controle ótimo para obtenção da lei de controle do atuador ativo, para o caso de realimentação de estado completa, com o intuito de estudar as limitações das suspensões passiva e ativa. O atual estágio de desenvolvimento do setor automobilístico caracteriza-se por projetos que incorporam, cada vez mais, sistemas de controle integrados em vários dos seus subsistemas. (**BARBIERI et al 2002**).

Os sistemas de suspensões automotivas tem sido alvo de estudos analíticos e experimentais, com o objetivo de melhorar a segurança e o conforto dos ocupantes de um veículo. A variação das forças dinâmicas de contato nas rodas, isto é, contato pneu e superfície de rodagem e a aceleração vertical nos veículos são bastante significativas para um bom desempenho, sem o qual, comprometem a segurança do veículo e o conforto dos ocupantes, caso a suspensão não esteja corretamente dimensionada (**NETO, 2001**).

Em tese uma suspensão ativa controla seus movimentos de amortecimento, através de sofisticados sensores, por um sistema operacional e uma unidade de controle com intuito de calcular a altura do veículo visa sua estabilidade, permitindo quando configurado adequadamente, fazer curvas em velocidades superiores aos veículos com suspensão convencional. Este sistema atua independentemente ou em conjunto corrigindo inclinações do veículo, permitindo ao motorista um

melhor controle da direção e aos passageiros, melhor conforto. Além deste controle, o sistema trabalha, mesmo em situações corriqueiras, como ao se parar em semáforos: o carro levanta automaticamente à dianteira enquanto o motorista estiver com o pé no freio, por entender necessário evitar o característico mergulho da carroceria durante a frenagem, reforçando, assim, a segurança nessa manobra. (MARTINS et al 2003).

2. Métodos e Materiais

As seções a seguir apresentam o estudo dos modelos matemáticos dos componentes que compõem um sistema de suspensão eletrônico, aplicado neste estudo.

2.1 Métodos – Modelagem

2.1.1 Sistema de suspensão veicular

Os sistemas de suspensão veicular são regidos por alguns parâmetros, assim, o modelo típico que será utilizado é o de 1/4 de um veículo (Fig.1). É importante lembrar que a rigidez do pneu, como seu amortecimento, não foi desprezada para base de parametrização do sistema.

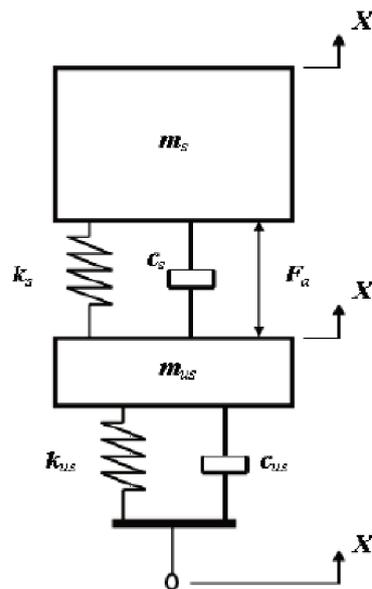


Figura 1 – Modelo de 1/4

suspensão veicular

Onde,

- m_s e m_{us} - massa da carroceria e a massa da roda;
- k_s e k_{us} - rigidez da suspensão e do pneu;
- c_s e c_{us} - amortecimento da suspensão e do pneu;
- F_a - força exercida pelo atuador pneumático;
- X_c , X_w e X_r - posições da carroceria, do eixo da roda e da estrada, respectivamente.

A energia cinética T , a energia potencial V e a energia dissipada R do sistema são dadas por:

$$T = \frac{1}{2} \cdot m_{us} \cdot \dot{X}_w^2 + \frac{1}{2} \cdot m_s \cdot \dot{X}_c^2 \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} \cdot k_{us} \cdot (X_w - X_r)^2 + \frac{1}{2} \cdot k_s \cdot (X_c - X_w)^2 \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot c_{us} \cdot (\dot{X}_w - \dot{X}_r) + \frac{1}{2} \cdot c_s \cdot (\dot{X}_c - \dot{X}_w) \quad (3)$$

Utilizando as equações de Lagrange obtêm-se as equações dinâmicas para o sistema ilustrado na Figura 1.

$$\begin{aligned} m_{us} \ddot{X}_w &= K_{us} \cdot (X_r - X_w) + C_{us} \cdot (\dot{X}_r - \dot{X}_w) - K_s \cdot (X_w - X_c) - C_s \cdot (\dot{X}_w - \dot{X}_c) - F_a \\ m_s \ddot{X}_c &= K_s \cdot (X_w - X_c) + C_s \cdot (\dot{X}_w - \dot{X}_c) + F_a \end{aligned} \quad (4)$$

A partir da Equação 4, define-se as variáveis de estado x_1 , x_2 , x_3 e x_4 por meio das relações de estado $\dot{X} = AX + BU$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{X}_c \\ \dot{x}_2 &= \ddot{X}_c = -\left(\frac{C_s}{m_s} \cdot \frac{C_{us}}{m_{us}}\right) \cdot x_1 + \left[\frac{C_s}{m_s} \cdot \left(\frac{C_s}{m_s} + \frac{C_s}{m_{us}} + \frac{C_{us}}{m_{us}}\right) - \frac{k_s}{m_s}\right] \cdot x_3 - \frac{C_s}{m_s} \cdot x_4 + \frac{F_a}{m_s} + \left(\frac{C_s}{m_s} \cdot \frac{C_{us}}{m_{us}}\right) \cdot X_r \\ \dot{x}_3 &= \dot{X}_c - \dot{X}_w = -\left(\frac{C_s}{m_s} + \frac{C_s}{m_{us}}\right) \cdot x_3 - \frac{C_w}{m_{us}} \cdot (X_r - x_1 + x_3) + x_4 \\ \dot{x}_4 &= -\left(\frac{k_s}{m_s} + \frac{k_s}{m_{us}}\right) \cdot x_3 - \frac{k_{us}}{m_{us}} \cdot (X_r - x_1 + x_3) + \left(\frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_{us}}\right) \cdot F_a \end{aligned} \quad (5)$$

Ao dispor matricialmente, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{C_s}{m_s} \cdot \frac{C_{us}}{m_{us}} & 0 & \frac{C_s}{m_s} \cdot \left(\frac{C_s}{m_s} + \frac{C_s}{m_{us}} + \frac{C_{us}}{m_{us}}\right) - \frac{k_s}{m_s} & -\frac{C_s}{m_s} \\ \frac{C_{us}}{m_{us}} & 0 & -\left(\frac{C_s}{m_s} + \frac{C_s}{m_{us}} + \frac{C_{us}}{m_{us}}\right) & 1 \\ \frac{k_{us}}{m_{us}} & 0 & -\left(\frac{k_s}{m_s} + \frac{k_s}{m_{us}} + \frac{k_{us}}{m_{us}}\right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m_s} & \frac{C_s}{m_s} \cdot \frac{C_{us}}{m_{us}} \\ 0 & -\frac{C_{us}}{m_{us}} \\ \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_{us}} & -\frac{k_{us}}{m_{us}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a \\ X_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$y = [0 \ 0 \ 1 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + [0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} F_a \\ X_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 Materiais e métodos

2.2.1 Atuador Pneumático

Foram utilizados no modelo de 1/4 de uma suspensão veicular 2 (dois) atuadores pneumáticos de mesma capacidade e especificações que simulam a resposta da suspensão e as excitações externas no sistema eletropneumático, em função do monitoramento e sinais emitidos pelos sensores instalados junto à unidade de controle, assim segue:

Tipo: Cilindro normalizado

Especificação: DNC-50-100-PPV-A

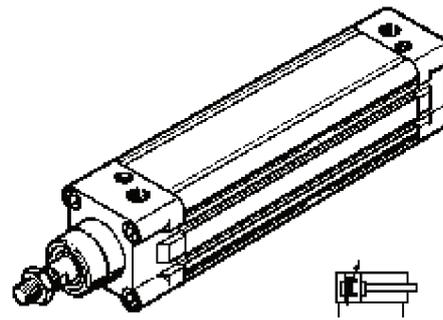


Figura 3 – Atuador Pneumático (**FESTO AUTOMAÇÃO LTDA**)

Tabela 1 – Características e especificações do Atuador Pneumático

2.2.2 Desenho de conjunto da suspensão

Na figura 1 tem-se um modelo de ¼ de uma suspensão veicular que aqui esta sendo representada pelo desenho de conjunto, como mostra a figura 4. Tem-se na figura 5 o desenho em 3D da suspensão projetada e posteriormente segue a tabela 2 de detalhamento das peças referente ao

Critério	Característica
Curso	100 mm
Diâmetro do êmbolo	50 mm
Rosca da haste	M16x1,5
Extremidade da haste	Rosca externa
Pressão operacional	0,6 - 12 bar
Modo de operação	Dupla ação
Energia de impacto nas posições finais	0,2 J
Curso de amortecimento	22 mm
Força teórica a 6 bar, retorno	990 N
Força teórica a 6 bar, avanço	1178 N
Massa móvel	538 g
Peso adicional por 10 mm de curso	64 g
Peso básico	1260 g
Fator de massa adicional por 10 mm de curso	25 g
Informação sobre material do corpo	Liga de alumínio por meio de laminação
Informação sobre material da haste	Aço de alta liga
Informação sobre material da camisa do cilindro	Liga de alumínio por meio de laminação

desenho de conjunto.

Nota-se conforme representação de detalhamento que este é composto por componentes mecânicos e pneumáticos, sendo o item 1, a placa de base com a finalidade de suportar e fixar todo o conjunto; o item 2, as guias de fixação que ajudam a inibir o efeito flambagem e guiar os

movimentos de simulação das massas, tanto da carroceria quanto as da roda; o item 3, a mola do sistema, para simular e amortecer todos efeitos externos e vibrações estimuladas no sistema; o item 4, a mola do pneu, para obedecer e não desprezar o efeito de amortecimento do pneu; o item 5, a massa da roda, para que este modelo respeite todos o parâmetros de uma suspensão veicular, não podemos esquecer desta variável de influência direta no sistema como a massa da roda que poderá variar e interferir na regulagem do sistema; o item 6, a massa da carroceria, esta terá o papel de representar $\frac{1}{4}$ da massa do veículo como exemplo; o item 7, o atuador pneumática que terá por finalidade estimular e responder à todas variações e irregularidades do solo, permitindo-o corrigi-las e estabilizar o veículo quanto à nivelção do veículo com o solo; e por fim, o item 8, o suporte de fixação, com a função de fixar tanto o atuador de simulação, quanto o atuador de controle, nas massas da carroceria e da roda respectivamente.

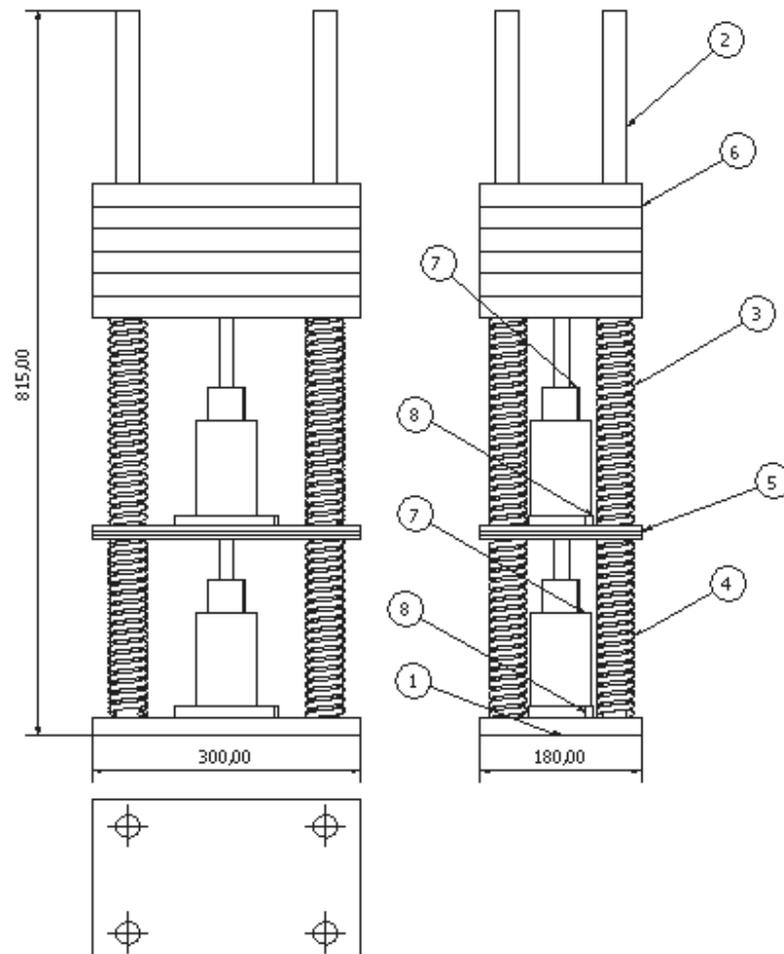


Figura 4 – Conjunto do Sistema de Amortecimento

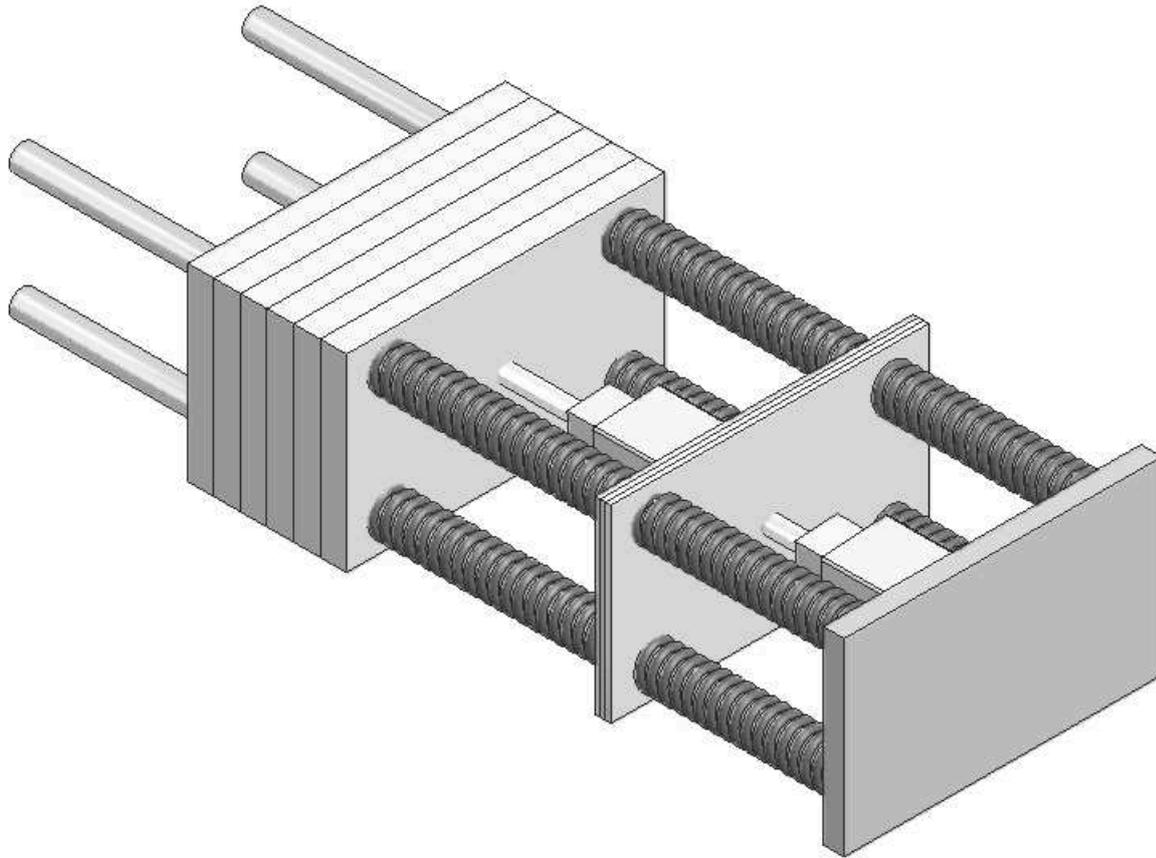


Figura 5 – Desenho em 3D da suspensão em conjunto

Tabela 2 – Lista de peças

Lista de Partes			
Item	Qtde	Parte	Descrição
1	1	Placa de base	Aço ABNT 1020 □ 180 x 300 x 20
2	4	Guia de fixação	Aço ABNT 1020 O 25 x 800
3	4	Mola Sistema	Aço ABNT 1070 O 42 x 250
4	4	Mola Pneu	Aço ABNT 1070 O 42 x 200
5	3	Massa Roda	Aço ABNT 1020 □ 180 x 300 x 5
6	6	Massa Carroceria	Aço ABNT 1020 □ 180 x 300 x 25
7	2	Atuador	Festo – DNC-50-100-PPV-A (163373)
8	2	Suporte de Fixação	Festo – FNC-50 (174378)

2.3. Métodos de Cálculo

Por questões de projeto foram utilizados valores pré-definidos e outros calculados para as variáveis que definem o conjunto. A tabela 3 apresenta os valores das variáveis como parâmetros do sistema usados no projeto.

Para dados de construção, tem-se que as dimensões de alguns componentes tiveram de ser projetadas e definidas através de cálculos e dados já pré-disponíveis. Os volumes unitário das massas da carroceria e da roda, foram obtidos através de cálculos com base na equação $m = \rho.v$, sendo que as massas e suas densidades já eram conhecidas. Os coeficientes de amortecimento das molas do sistema e das molas que simulam o amortecimento do pneu foram definidos considerando que uma mola de um sistema de suspensão real fosse dividida em quatro unidades, tendo assim cada, um coeficiente onde se somá-las tem-se a rigidez equivalente. Para todos estes, segue na tabela 3, os parâmetros do sistema utilizados no projeto.

Tabela 3 – Parâmetros do sistema utilizados no projeto

Item	Valor	Quantidade
Massa Roda	2 kg	3
Massa Carroceria	10 kg	6
Rigidez do Sistema	25,5 kN/m	4
Rigidez do Pneu	2,02 kN/m	4

3. Resultados

Os valores dos parâmetros utilizados nas simulações estão mostrados na Tabela 4 abaixo. Estes valores foram extraídos de (SHEN et al 2003) e (FURST, 2001).

Tabela 4 – Parâmetros do sistema utilizados nas simulações

A_p	0,0011 m ²	K_s	8090 N/m
B	340 N.s/m	K_{sv}	0,0157 m/A
β_e	1,6x10 ⁶ N/m ²	K_{us}	102000 N/m
C_s	1145 N.m/s	m_s	253 kg
C_{us}	415 N.m/s	m_{us}	26 kg
K_{co}	2,7x10 ⁻¹¹ m ⁵ /N.s	τ	0,03 s
K_{qo}	0,00025 m ³ /V.s	V_t	0,00011 m ³

A partir das simulações das equações 6 e 7 obteve-se para uma perturbação em $X_r = 15\text{cm}$, a resposta entre os deslocamento X_1 e X_2 , como mostra a figura 6.

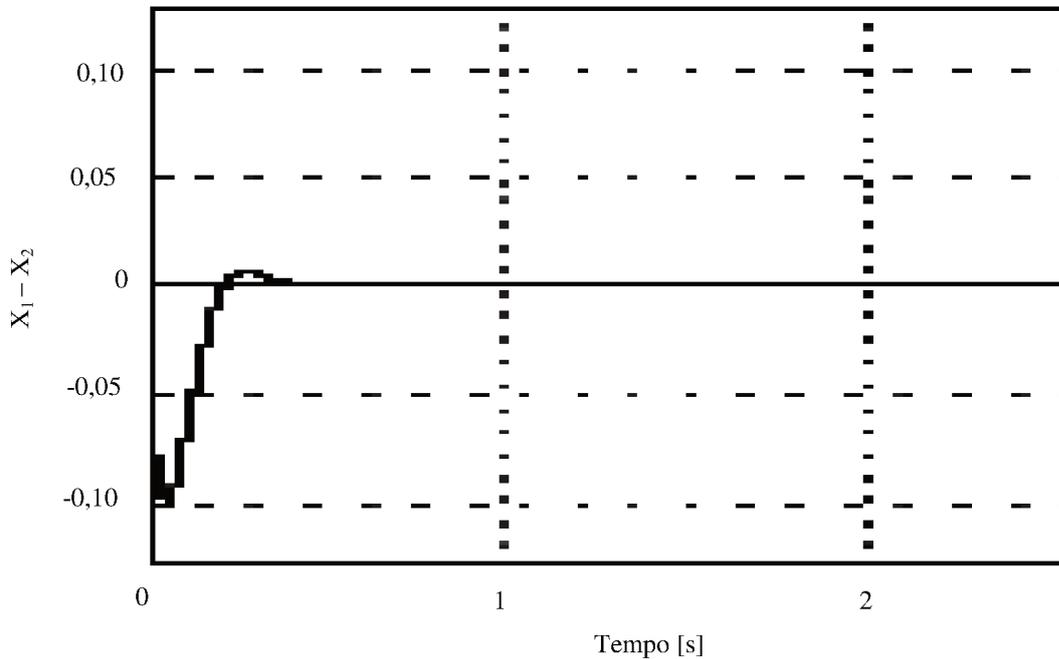


Figura 6 – Resposta em MF (Malha Fechada) a uma perturbação degrau de 15 cm

4. Conclusão

Inicialmente geraram-se as equações de movimento da suspensão e obtivemos a resposta por meio de uma simulação conforme ilustrado na figura 6. A segunda etapa deste projeto refere-se ao desenho de conjunto e detalhe da suspensão conforme ilustrado nas figura 4. Nota-se que as massas e a rigidez das molas utilizadas como parâmetros nesta simulação, diferem dos valores apresentados no projeto. Esta consideração foi aplicada em virtude do porte do projeto de $\frac{1}{4}$ de suspensão real visando um conjunto em escala reduzida. A terceira etapa refere-se à construção da suspensão, considerando como trabalho futuro, tendo em vista o tempo de conclusão deste trabalho.

5. Referências

ALVES, P. S. L., “Análise Comparativa do Desempenho de uma Suspensão Veicular Considerando Elementos Passivos e Ativos”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997, p.131.

BARBIERI, F. A. A., “Prototipagem Virtual: Modelagem e Controle de Dinâmica Veicular”, SAE Brasil, *Anais do 11º Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia da Mobilidade*, São Paulo, SP, Brasil, 2002, p.12.

FURST, F., “Sistematização do Projeto Preliminar de Circuitos Hidráulicos com Controle de Posição”. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2001.

LI, K., NAGAI, M., “Control and Evaluation of active suspension for MDOF vehicle model”, *JSAE – Society of Automotive Engineers of Japan, Review* 20, 1999, p.343-348.

MARTINS, W., ARANTES, R., CARVALHO, T. M., “Suspensão Pneumática Ativa”, Trabalho de Graduação para Iniciação Científica, Universidade de Taubaté, SP, 2003, p.03-06.

MOURA, E. D. A., “Análise de uma Suspensão Veicular Considerando Elementos Passivos e Ativos”, Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2001, p.120.

NETO, A. R., “Implementação de um Modelo Numérico para Estudos de Conforto Vibracional em Automóveis”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, MG, 2001, p.132.

SHEN, X., & PENG, H., “Analysis of Active Suspension Systems with Hydraulic Actuators” IAVSD, Conference, Atsugi, Japan, 2003.