

# ESTRATÉGIA DE CONTROLE FUZZY PARA SUSPENSÃO ATIVA AUTOMOBILÍSTICA

CARLOS PINHEIRO

*Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação - Universidade Federal de Itajubá  
Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Cep 37500-903, Itajubá – MG, Brasil  
E-mail: pinheiro@iee.efei.br*

**Abstract**— This paper proposes a control strategy for systems of automotive active suspension using fuzzy logic and shows how to generate the necessary rules. In this work will be shown the control main algorithms for systems of active suspension or semi-active, such as strategies on/off, continually variable, optimal control, etc. The resultant actions of the control laws are compared to each other through numeric simulations and experimental tests. Analyses of results show the advantages and disadvantages of the used methods.

**Keywords**— Fuzzy control, automotive suspensions, active suspension, control systems, optimal control.

**Resumo**— Este artigo propõe uma estratégia de controle para sistemas de suspensão ativa automobilística utilizando lógica nebulosa e mostra como gerar as regras necessárias. Neste trabalho serão mostrados os principais algoritmos de controle para sistemas de suspensão ativa ou semi-ativa, tais como estratégias on/off, continuamente variável, controle ótimo, etc. As ações resultantes das leis de controle são comparadas entre si através de simulações numéricas e de testes experimentais. Análises de resultados mostram as vantagens e desvantagens dos métodos utilizados.

**Palavras-chave** — Controle nebuloso, suspensão automobilística, suspensão ativa, sistemas de controle, controle ótimo.

## 1 Introdução

Os sistemas de suspensão convencionais, também chamados passivos, são utilizados a muitas décadas em veículos automotivos com a finalidade de amortecer vibrações nos chassis dos mesmos quando suas rodas recebem deslocamentos verticais abruptos, devido basicamente a características dos pavimentos por onde trafegam. Estes deslocamentos são ocasionados por buracos, lombadas, ondulações e outras características das ruas ou pistas. Entre os componentes básicos de um sistema de amortecimento pode-se citar os feixes de molas, os amortecedores e os pneus emborrachados (Williams, 1997). Os sistemas que utilizam amortecedores convencionais ou passivos são simples e apresentam boas características de robustez, têm custo mais reduzido que os ativos e atuam bem em condições normais de operação.

Nas últimas duas décadas desenvolveram e aperfeiçoaram sistemas de suspensão ativa ou semi-ativa, onde modificações nas atuações dos componentes da suspensão, como em molas hidro-pneumáticas ou amortecedores controlados, resultaram em melhorias de condições de conforto e segurança. Nestas estruturas pode-se empregar amortecedores ativos onde modificações na pressão dos fluidos dos mesmos (através de válvulas proporcionais de comando), alteram as características das suas forças de atuação. Ou usar amortecedores que contenham fluidos com propriedades magnéticas (Bica, 2002), onde bobinas elétricas nestas estruturas geram campos magnéticos que alteram as características magneto-reológicas dos fluidos, e consequentemente suas forças de atuação. O termo semi-ativo refere-se a sistemas que não necessitam de energia externa adicional, além daquela necessária para acionar dispositivos como válvulas, bobinas, atuadores, etc.

Modelos básicos de sistemas de suspensão utilizam a representação de uma roda do veículo a ser estudado (em automóveis esta representação é chamada de modelo de  $\frac{1}{4}$  de carro). A Fig. 1 ilustra tanto um sistema de suspensão passiva como ativa. O feixe de mola e o amortecedor passivo de uma estrutura de suspensão convencional são representados pelos seus coeficientes  $K_f$  e  $B_a$  respectivamente. O parâmetro  $M_s$  corresponde à massa suspensa (carroceria) do veículo, sustentada pelo sistema de suspensão. A constante  $M_r$  modela a massa do conjunto roda mais pneu e  $K_p$  representa a elasticidade do mesmo.

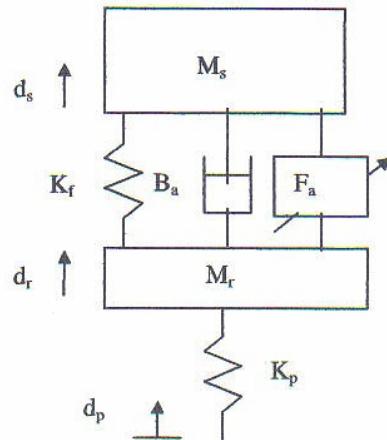


Figura 1. Modelo básico de suspensão automobilística.

Os deslocamentos  $d_p$ ,  $d_r$  e  $d_s$  são movimentos verticais do pneu, da roda e da carroceria respectivamente. A força  $F_a$  pode representar a atuação exercida por um mecanismo visando impor determinadas características dinâmicas na suspensão. Esse dispositivo pode ser um amortecedor ativo que substitui um amortecedor passivo. A modelagem básica adotada

neste trabalho é usual na literatura (Williams, 1997 e Yue et al., 1989). Outros modelos mais elaborados que consideram dinâmicas longitudinais, verticais e laterais de um veículo também são tratados na literatura especializada (Barbieri e Neto, 2002).

A modelagem matemática destes sistemas pode ser feita através de equações diferenciais, variáveis de estado ou por funções de transferência. Considerando as forças que agem sobre os elementos da suspensão, pode-se escrever as equações (1) e (2). Neste trabalho serão usados valores de parâmetros de um sistema de suspensão típico:  $M_s = 400$  [Kg];  $M_r = 50$  [Kg];  $B_a = 1000$  [Ns/m];  $K_f = 20000$  [N/m];  $K_p = 250000$  [N/m]. Geralmente os parâmetros de uma suspensão automobilística são escolhidos para definir uma freqüência natural em torno de 1 [Hz] em  $d_s$  e de 10 [Hz] em  $d_r$ .

$$M_s \ddot{d}_s + B_a (\dot{d}_s - \dot{d}_r) + K_f (d_s - d_r) - F_a = 0 \quad (1)$$

$$M_r \ddot{d}_r + B_a (\dot{d}_r - \dot{d}_s) + K_f (d_r - d_s) + K_p (d_p - d_r) - F_a = 0 \quad (2)$$

## 2 Estratégias de Controle

Visando obter um modelo matemático mais apropriado para analisar sistemas de suspensão ativa em vários contextos de estruturas de controle, as equações de modelagem (1) e (2) serão convertidas em variáveis de estado. Neste trabalho serão adotadas as substituições de variáveis dadas abaixo, definindo as equações de estado (3).

$$\dot{x}_1 = d_s; \dot{x}_2 = \dot{d}_s = \dot{x}_1; \dot{x}_3 = d_r; \dot{x}_4 = \dot{d}_r = \dot{x}_3; \ddot{d}_s = \ddot{x}_2; u_1 = d_p; u_2 = F_a$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{K_f}{M_s} x_1 - \frac{B_a}{M_s} x_2 + \frac{K_f}{M_s} x_3 + \frac{B_a}{M_s} x_4 + \frac{1}{M_s} u_2 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{K_f}{M_r} x_1 + \frac{B_a}{M_r} x_2 - \frac{K_f + K_p}{M_r} x_3 - \frac{B_a}{M_r} x_4 + \frac{K_p}{M_r} u_1 - \frac{1}{M_r} u_2 \end{aligned} \quad (3)$$

A variável  $x_1$  representa o deslocamento vertical da massa suspensa,  $x_2$  a velocidade da mesma e a derivada desta última a aceleração correspondente. A variável  $x_3$  representa o deslocamento vertical da roda,  $x_4$  a sua velocidade e a derivada desta a aceleração resultante. A variável  $u_1$  expressa uma perturbação na suspensão, o movimento vertical do pneu. A grandeza  $u_2$  representa a força de atuação/compensação de um sistema de suspensão ativa (por exemplo, de um amortecedor ativo). Esta entrada com valor sempre nulo ( $F_a = 0$ ) representa um sistema de suspensão passiva. Em muitas estruturas de suspensão ativa um amortecedor ativo ou semi-

ativo pode substituir o amortecedor passivo como elemento de dissipação de energia do sistema de suspensão. Desta maneira o valor do parâmetro  $B_a$  na modelagem resultante pode ser nulo, pois o amortecedor passivo é substituído por um ativo representado pela força de atuação  $F_a$ .

Perturbações ou distúrbios usuais em análises de sistemas de suspensões são os movimentos abruptos, tipo deslocamentos em degrau no pneu do veículo. A Fig. 2 ilustra a aceleração da massa suspensa (carroceria do veículo), para uma suspensão passiva sujeita a um deslocamento ( $u_1 = d_p$ ) vertical repentino de 0,05 [m] no pneu. Esta curva de aceleração para um distúrbio em degrau será usada como referência para comparações com algumas estratégias de controle de suspensão ativa que serão vistas nos próximos itens. A aceleração da carroceria é uma das grandezas usadas como indicador do desempenho de sistemas de suspensão. Nos próximos itens serão vistos os tipos de estratégias de controle para suspensões ativas ou semi-ativas freqüentemente citadas na literatura e nos artigos técnicos. As mais utilizadas são as políticas *on/off*, continuamente variável e as técnicas de controle ótimo. A contribuição deste artigo é a proposta de uma estratégia de controle com lógica fuzzy, cujas regras nebulosas utilizadas serão geradas através de análises qualitativas.

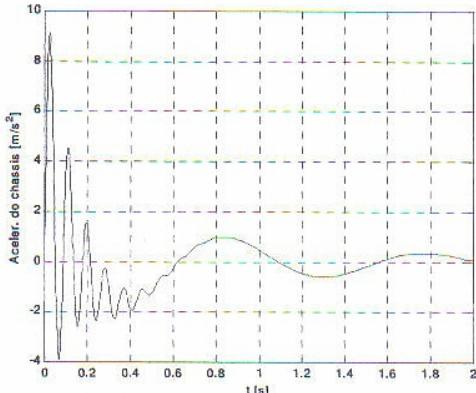


Figura 2. Aceleração do chassis para suspensão passiva.

### 2.1 Controle On/Off e Continuamente Variável

Estratégias de controle para sistemas suspensões semi-ativa tem sido propostos a várias décadas. Os dois tipos mais básicos são o *on/off* e o continuamente variável (Miller e Nobles, 1997). A política de controle *on/off* básica é representada por (4), onde  $F_a$  expressa a força exercida pelo amortecedor ativo, sendo  $C_{on}$  e  $C_{off}$  os valores do coeficiente de atrito do mesmo (obtidos por vazamento do fluido do amortecedor ou alterando suas propriedades magnéticas).  $V_{abs}$  é a velocidade absoluta da massa suspensa e  $V_{rel}$  a velocidade relativa entre a massa suspensa e a massa do conjunto da roda (respectivamente,  $x_2$  e  $x_2 - x_4$  nas variáveis de estado). Se a velocidade absoluta e a velocidade relativa possuem o mesmo sinal algébrico, então um estado de alto amortecimento é selecionado

através de um coeficiente  $C_{on}$ . Agora, se os sinais forem opostos, um estado de baixo amortecimento é selecionado através de um coeficiente  $C_{off}$ . Velocidade relativa positiva é definida com as massas  $M_s$  e  $M_r$  (Fig. 1) se afastando. Velocidade absoluta positiva é definida com o movimento para cima da massa suspensa ( $M_s$ ).

A equação (5) representa uma estratégia de controle continuamente variável típica. A diferença básica em relação à estratégia (4) é que a força produzida (quando a velocidade absoluta e a velocidade relativa possuem o mesmo sinal algébrico), é proporcional a velocidade absoluta também. Valores adequados para os parâmetros do sistema de suspensão referenciado são de coeficientes de amortecimento em  $C_{off} = 500$  [Ns/m] e  $C_{on} = 1400$  [Ns/m].

$$F_a = \begin{cases} C_{on} V_{rel} & \text{se } V_{abs} V_{rel} \geq 0, \\ C_{off} V_{rel} & \text{se } V_{abs} V_{rel} < 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$F_a = \begin{cases} C_{on} V_{abs} + C_{off} V_{rel} & \text{se } V_{abs} V_{rel} \geq 0, \\ C_{off} V_{rel} & \text{se } V_{abs} V_{rel} < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Visando minimizar determinadas características operacionais, como eventuais solavancos e ruídos audíveis indesejáveis, foram desenvolvidas melhorias nestes algoritmos (para maiores detalhes ver Miller e Nobles, 1997). O conceito envolvido por estas abordagens relaciona-se com o chaveamento repentino do amortecedor ativo, de uma taxa de amortecimento baixa para uma taxa alta em velocidades relativas mais intensas.

## 2.2 Estratégia com Métodos de Controle Ótimo

Alguns trabalhos (p. ex., Williams, 1997 e Yue et al., 1989) têm empregado métodos de controle ótimo para controlar sistemas de suspensão ativa. A lei de controle é expressa pela equação (6), onde o vetor  $x$  representa os valores das variáveis de estado ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_4$ ) correspondentes aos deslocamentos e velocidades do sistema de suspensão. O vetor  $K$  ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  e  $K_4$ ) representa ganhos que são calculados através das expressões (7). A matriz  $A$  é dada pelos coeficientes das variáveis de estado de (3) e a matriz  $B$  pelos coeficientes das variáveis de entrada  $u_1$  e  $u_2$ . A função de custo  $J$  relaciona através das ponderações da matriz  $Q$  e do escalar  $R$ , pesos que atribuem maior ou menor grau de predominância nas variáveis sob controle, ou seja, nas variáveis de estado relacionadas com a dinâmica do sistema, assim como na força de compensação exercida pelo amortecedor da suspensão ativa (que está relacionada com a energia de atuação do sistema). Este tipo de controle é conhecido

como regulador linear quadrático (*LQR*). Usando-se técnicas de observadores de estado pode se estimar a maioria das variáveis de estado a partir da medida do sinal de comando da entrada e da variável de saída do sistema (economizando desta forma o número de transdutores a serem empregados). Já foi proposto o uso de redes neurais artificiais em sistemas de suspensão ativa visando reduzir o número de sensores (Ricardo, 1998). Quando é empregado um filtro de Kalman para estimação das variáveis de estado, este tipo de controle é chamado de regulador linear quadrático gaussiano (*LQG*). Para os parâmetros da suspensão usada como exemplo, e para determinadas condições de otimização, pode-se obter através das expressões (6) e (7) os ganhos:  $K_1 = 20,4$ ;  $K_2 = 1200$ ;  $K_3 = -10$ ;  $K_4 = -500,6$ . Considerando a implementação de observadores de estado ou filtros de Kalman, o esforço computacional em sistemas de controle ótimo tende a ser maior que nas estruturas *on/off* ou continuamente variável.

$$F_a = u_2 = -Kx = -(K_1 x_1 + K_2 x_2 + K_3 x_3 + K_4 x_4) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} J &= \int_0^{\infty} (x^T Q x + F_a^T R F_a) dt \\ A^T P + PA - PB R^{-1} B^T P + Q &= 0 \quad (7) \\ K &= R^{-1} B^T P \end{aligned}$$

## 3 Estratégia Fuzzy

Neste artigo será utilizada uma estratégia de controle para suspensões ativas usando lógica nebulosa, com justificativas para as regras nebulosas empregadas. A utilização de lógica *Fuzzy* já foi considerada em outros trabalhos de suspensão ativa (Yoshimura et al., 1999; Cal e Konik, 1996). Entretanto, estas estratégias de controle fuzzy funcionavam em conjunto com outras técnicas de controle (alocação de pólos, controle ótimo, etc.), ou utilizavam regras difusas obtidas empiricamente sem um embasamento que permita nortear melhorias ou modificações. Uma das vantagens da lógica nebulosa em diversas áreas de aplicações é a sua característica de incorporar informações lingüísticas nas estratégias de decisão (Lee, 1990). Pode-se obter regras nebulosas através da análise do contexto da aplicação desejada, codificando lingüisticamente informações do sistema a ser controlado. Ou usar técnicas de treinamento, agrupamento, etc. para extrair as informações necessárias (Wang, 1994). Em termos de modelagem os sistemas fuzzy podem ser interpretados como aproximadores universais de funções.

Neste trabalho as regras nebulosas são obtidas através do conhecimento ou de informações básicas de um sistema de suspensão ativa previamente estabelecido. Conceitos da estratégia continuamente variável serão usados devido as suas boas características e por ser freqüentemente empregada na prática. As informações para obtenção das regras fuzzy virão da interpretação lingüística da estratégia de controle continuamente variável representada pelo algoritmo em (5). A escolha adequada das funções de pertinência dos conjuntos nebulosos de suporte, simétricas e igualmente espaçadas como as Fig. 3, 4 e 5, pode suavizar eventuais descontinuidades na força de atuação (isto tende a minimizar problemas de solavancos e ruídos indesejáveis). Os universos de discurso dos conjuntos nebulosos foram escolhidos em razão da faixa de excursão das variáveis utilizadas nos modelos de suspensão ativa com os parâmetros já exemplificados neste trabalho. Os conjuntos fuzzy para as variáveis utilizadas ( $V_{abs}$ ,  $V_{rel}$  e  $F_a$ ) serão denotados lingüisticamente como: *NG* (negativo grande); *NM* (negativo médio); *ZE* (zero); *PM* (positivo médio); *PG* (positivo grande). Pode-se definir outros conjuntos, mas quanto maior o número deles, maior o esforço computacional para implementar a lógica e como será visto, apenas os conjuntos citados são suficientes para obter as características desejadas.

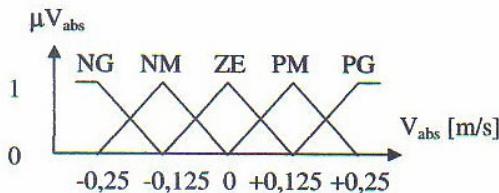


Figura 3. Função de pertinência para a velocidade absoluta.

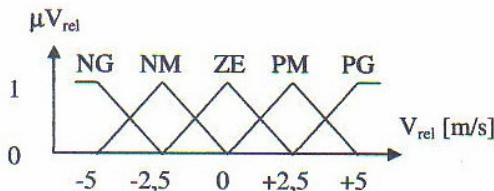


Figura 4. Função de pertinência para a velocidade relativa.

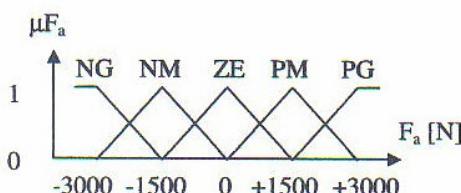


Figura 5. Função de pertinência para a força de atuação.

Genericamente as regras nebulosas podem ser expressas por (8), onde  $G_n$ ,  $H_n$  e  $I_n$  representam os conjuntos fuzzy de suporte. A conversão dos dados das variáveis de velocidade em valores de pertinência ( $\mu V_x$ ) correspondentes aos conjuntos nebulosos é conhecida como fuzificação. A composição dos antecedentes das regras pode ser realizada usando opera-

dores do tipo produto, e a agregação dos efeitos das regras ativadas pode ser realizada através de técnicas de defuzificação tipo centro de área. As regras nebulosas podem ser representadas de forma tabular como ilustrado na Tabela 1. A seguir será visto como obter os consequentes destas regras para um sistema de suspensão ativa.

$$R_n: \text{If } V_{abs} \text{ is } G_n \text{ And } V_{rel} \text{ is } H_n \text{ Then } F_a \text{ is } I_n \quad (8)$$

Tabela 1 – Representação tabular de regras fuzzy.

$F_a$	$V_{abs}$					
	<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>ZE</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>	
$V_{rel}$	<i>NG</i>	$I_1$	$I_6$	$I_{11}$	$I_{16}$	$I_{21}$
	<i>NM</i>	$I_2$	$I_7$	$I_{12}$	$I_{17}$	$I_{22}$
	<i>ZE</i>	$I_3$	$I_8$	$I_{13}$	$I_{18}$	$I_{23}$
	<i>PM</i>	$I_4$	$I_9$	$I_{14}$	$I_{19}$	$I_{24}$
	<i>PG</i>	$I_5$	$I_{10}$	$I_{15}$	$I_{20}$	$I_{25}$

Analisando o algoritmo (5) é fácil constatar as condições (9) e (10):

$$V_{abs} V_{rel} \geq 0 \text{ se } \begin{cases} V_{abs} = 0 \text{ ou } V_{rel} = 0, \\ V_{abs} > 0 \text{ e } V_{rel} > 0, \\ V_{abs} < 0 \text{ e } V_{rel} < 0. \end{cases} \quad (9)$$

$$V_{abs} V_{rel} < 0 \text{ se } \begin{cases} V_{abs} > 0 \text{ e } V_{rel} < 0, \\ V_{abs} < 0 \text{ e } V_{rel} > 0. \end{cases} \quad (10)$$

Da primeira condição de (9) em (5) é fácil verificar que a regra  $I_{13}$  deve gerar um efeito nulo (ou próximo disto), ou seja, a força de atuação deve ter a atribuição de um conjunto nebuloso *ZE*. Com a última condição de (10) em (5) fica claro que  $I_5$  deve ser *PM*, pois  $V_{rel}$  é intensa no sentido positivo e o coeficiente de amortecimento é baixo, assim a força tende a ser média e positiva. Com a primeira condição de (10) em (5) é fácil notar que  $I_{21}$  é *NM*, pois  $V_{rel}$  é intensa no sentido negativo e o coeficiente de amortecimento é baixo, assim a força tende a ser média e negativa. Da terceira condição de (9) em (5) fica claro perceber que  $I_1$  é *NG*, pois  $V_{abs}$  é intensa no sentido negativo e o coeficiente de amortecimento é alto, assim a força tende a ser grande e negativa. De forma similar, analisando os limites de (9) e (10) em (5) é relativamente simples estabelecer as outras regras nebulosas como indicado na Tabela 2.

A Fig. 6 ilustra as curvas de aceleração da massa suspensa usando as diversas estratégias. As cores identificam o tipo de suspensão em questão: *Preto*=Passiva; *Vermelho*=On/Off; *Verde*=Continuaam. Variável; *Azul*=Controle Ótimo; *Cinza*=Controle Fuzzy. Visando comparar características entre as diversas estratégias de controle, serão mostrados gráficos das forças de atuação dos amortecedores e deslocamentos da massa suspensa. Estes dados estão representados nos gráficos das Fig. 7 e 8. A Tabela 3 contém os valores eficazes (*RMS-Root Measurement Square*) das principais grandezas físicas das estratégias de controle (algumas representadas nos gráficos das figuras). A Tabela 4 mostra os valores máximos absolutos e os tempos de acomodação (para +/-2% dos valores *RMS*) dessas grandezas.

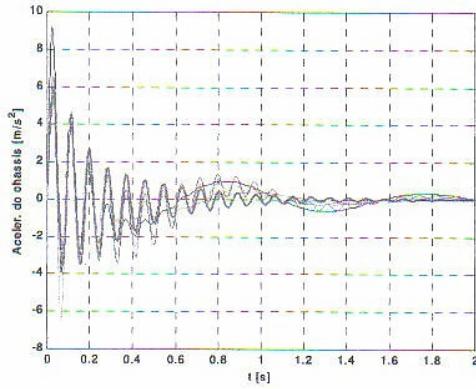


Figura 6. Aceleração do chassis nas diversas estratégias.

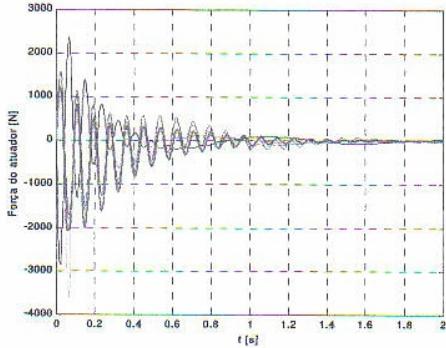


Figura 7. Força de atuação nas diferentes estratégias.

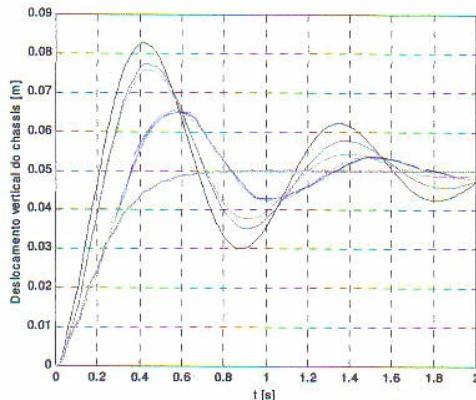


Figura 8. Movimento do chassis nas diversas estratégias.

Tabela 3. Valores Eficazes (RMS).

	Valor RMS				
	Passiva	On/Off	Cont. Var.	Cont. Ótimo	Cont. Fuzzy
<i>Aceler. Chassis</i>	1,42 [m/s <sup>2</sup> ]	1,22 [m/s <sup>2</sup> ]	1,27 [m/s <sup>2</sup> ]	1,37 [m/s <sup>2</sup> ]	1,10 [m/s <sup>2</sup> ]
<i>Força Amort.</i>	457 [N]	497 [N]	418 [N]	411 [N]	470 [N]
<i>Desloc. Chassis</i>	0,053 [m]	0,049 [m]	0,051 [m]	0,051 [m]	0,046 [m]
<i>Veloc. Chassis</i>	0,125 [m/s]	0,074 [m/s]	0,102 [m/s]	0,108 [m/s]	0,054 [m/s]

Tabela 4. Valores máximos e tempos de acomodação.

	Valor Máximo / Tempo Acomodação				
	Passiva	On/Off	Cont. Var.	Cont. Ótimo	Cont. Fuzzy
<i>Aceler. Chassis</i>	9,0 [m/s <sup>2</sup> ]	6,6 [m/s <sup>2</sup> ]	6,5 [m/s <sup>2</sup> ]	6,4 [m/s <sup>2</sup> ]	5,7 [m/s <sup>2</sup> ]
	1,85 [s]	2,10 [s]	2,00 [s]	2,10 [s]	1,60 [s]
<i>Força Amortec.</i>	2860 [N]	3614 [N]	1801 [N]	1694 [N]	2070 [N]
	> 2 [s]	1,80 [s]	1,80 [s]	2,00 [s]	1,60 [s]
<i>Desloc. Chassis</i>	0,082 [m]	0,065 [m]	0,075 [m]	0,077 [m]	0,0 [m]
	2,00 [s]	1,95 [s]	1,95 [s]	> 2 [s]	0,76 [s]
<i>Veloc. Chassis</i>	0,33 [m/s]	0,21 [m/s]	0,30 [m/s]	0,30 [m/s]	0,20 [m/s]
	2,10 [s]	1,93 [s]	2,10 [s]	1,75 [s]	1,25 [s]

Analisando as informações dos gráficos e das tabelas verifica-se que a suspensão passiva é a que apresenta a maior aceleração, deslocamento e velocidade da carroceria. O valor máximo absoluto ou o valor eficaz da força de atuação do amortecedor ativo (ou semi-ativo) é menor para a estratégia que usa técnica de controle ótimo, mas os respectivos tempos de acomodação são em geral maiores para boa parte das outras grandezas físicas. Das estratégias de controle, a do tipo *on-off* é a de mais fácil implementação, mas pode apresentar problemas de solavancos e ruídos audíveis indesejáveis. Neste sentido a estratégia do tipo continuamente variável é mais vantajosa que a *on/off* e é relativamente simples de ser implementada. A estratégia proposta de controle *fuzzy* foi a que apresentou as melhores características dinâmicas em geral. Apesar das regras da estratégia difusa serem obtidas a partir dos conceitos da política continuamente variável, o melhor desempenho da estratégia *nebulosa* é explicado devido a sistemas *fuzzy*.

serem interpoladores universais de funções. E a escolha adequada das funções de pertinência permite minimizar eventuais descontinuidades na força do amortecedor ativo, reduzindo assim problemas de ruídos.

#### 4 Bancada de Ensaio

Visando obter resultados reais foi montada uma bancada para realizar ensaios experimentais (Fig. 9). A parte central da foto indica o sistema de suspensão em escala reduzida com os seus elementos: massa suspensa em cores verde e vermelha; feixe de mola e amortecedor em cor preta; bloco representativo da roda em cor cinza. Os cabos brancos são dos transdutores (acelerômetros) do sistema, cujos condicionadores estão ao lado do microcomputador. A caixa a esquerda da foto é um atuador linear transistorizado para acionar o amortecedor ativo. O computador implementa por *software* os algoritmos de controle, e contém uma placa de aquisição de dados que faz a interface com os transdutores e o atuador.

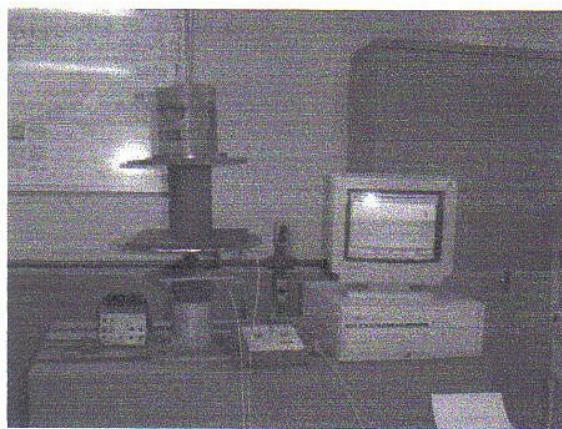


Figura 9. Foto da bancada experimental.

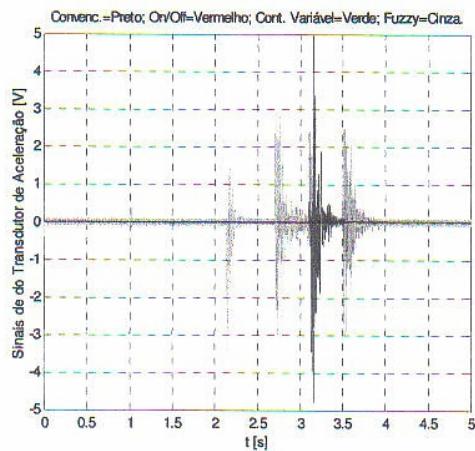


Figura 10. Sinais de acelerações reais.

A Fig. 10 mostra resultados de ensaios reais. Os dados foram coletados do transdutor de aceleração da massa suspensa e depois agrupados em um único

gráfico. É fácil notar que os desempenhos das políticas de controle estão coerentes com as análises anteriores, mesmo com parâmetros em escala reduzida.

#### 5 Conclusão

Neste trabalho apresentou-se os principais algoritmos de controle para sistemas de suspensão ativa. Foi proposta uma estratégia usando lógica *fuzzy*, mostrando como gerar as regras nebulosas necessárias. As diferentes leis de controle foram comparadas entre si. Os dados obtidos indicaram as vantagens e desvantagens das diversas estratégias.

#### Agradecimentos

O autor agradece a FAPEMIG (TEC 195/01) o suporte financeiro para a realização desta pesquisa. Agradecimentos ao aluno Jeremias B. Machado pela implementação da bancada e aos professores José Juliano de Lima Jr., Antonio Bombard e José Célio Dias pelos dispositivos e equipamentos utilizados.

#### Referências Bibliográficas

- Barbieri, F. A. A., Neto, A. C. (2002). Prototipagem virtual: Modelagem e Controle de dinâmica veicular. *11º Congresso Int. Tecnolog.*
- Bica, I. (2002). Damper with magneto-rheological suspension. *Journal of Magnetic Materials*, 241: 196-200.
- Cal, B., Konik, D. (1996). Intelligent vehicle active suspension control using fuzzy logic. *10<sup>th</sup> IFAC, Triennial World Congress*, pp. 51-56.
- Lee, C. C. (1990). Fuzzy logic control systems: fuzzy logic controller – Part I and II. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 20:404-435.
- Miller, L. R., Nobles, C. M. (1997). Métodos para eliminar solavanco (*Jerk*) e ruído em suspensões semi-ativas. *Lord Corp.*, SAE n. 902284.
- Ricardo R. M. (1998). Controle semi-ativo de suspensões automotivas. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- Yoshimura et al. (1999). Active suspension of passenger cars using linear and fuzzy-logic controls. *Control Engineering Practice* 7:41-47.
- Yue et al. (1989). Alternative control laws for automotive active suspensions. *J. Dyn. Syst., Measur, & Control*, 111:286-291.
- Wang, L. X. (1994). Adaptive fuzzy systems and control. Prentice Hall.
- Williams, R. A. (1997). Automotive active suspensions. Part1: Basic principles. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 211:415-426.