

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

# SUSPENSÃO ATIVA

Alunos

Fábio Araújo Grandi  
Inácio Kiyoshi Matsuo  
Maurício Prandi Valadares  
Paulo Roberto Cassoli Mazzali

Orientadores

Nicola Getschko  
Luís Eduardo Lopes

Agradecimentos

Prof. Manoel Lélío Martins de Carvalho Jr.  
Prof. Newton Maruyama  
Aluno Guilherme Santos Severino  
Aluno Mauricio Corazza

## ÍNDICE

APRESENTAÇÃO	1
HISTÓRICO DA SUSPENSÃO ATIVA.	3
ESTUDO DA NECESSIDADE	5
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	8
FUNDAMENTOS DA DINÂMICA DE VEÍCULOS	12
CONFORTO	28
MODELO DA SUSPENSÃO A SER ADOTADA	33
SISTEMA DE CONTROLE ELETRÔNICO	39
SIMULAÇÕES	64
MODELO	77
RESULTADOS	100
CONCLUSÃO	101
BIBLIOGRAFIA	103
APÊNDICE	104

## APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido por Fábio Araujo Grandi, Inácio Kiyoshi Matsuo, Maurício Prandi Valadares e Paulo Roberto Cassoli Mazzali, durante o ano letivo de 1992 para as disciplinas PROJETO MECÂNICO I e II (PMC-580 e PMC-581) ministradas pelos professores Luís Eduardo Lopes e Nicola Getschko no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PMC-EPUSP)

A idéia básica é estudar e desenvolver um dispositivo que quando instalado na suspensão de um veículo melhore as suas condições de dirigibilidade. Esse dispositivo em conjunto com a suspensão tradicional passa a ser a 'Suspensão Ativa' do título. Esse título foi mantido apesar de logo no início perceber-se que ele não representava bem o conceito da suspensão, um nome mais apropriado seria 'Suspensão Reativa', já que ela não faz um levantamento prévio do solo e se adapta ao seu perfil, mas reage a excitações externas (entradas do solo) e internas (comandos a partir do motorista).

As hipóteses iniciais para esse trabalho foram: melhorar a estabilidade e segurança do veículo. Essas hipóteses foram direcionadas por uma visão prática do assunto, pensando em termos reais de mercado, e não puramente teórica. Assim muitas idéias foram aproveitadas da prática e do 'know-how' da indústria automobilística, visando uma implantação a curto praso em uma linha comercial de veículos. Além disso procurou-se otimizar as respostas de um veículo, elevando seus níveis de resposta atuais, e não oferecer um sistema mágico que atendesse a 100% das solicitações. Isso, infelizmente, desmistifica a 'suspensão ativa', pois ela apenas vai melhorar o comportamento do carro na

maioria das situações, mas não terá a resposta ótima em todas as situações, pelo menos no escopo deste projeto.

Baseado nessas diretrizes iniciais, fez-se um levantamento da situação atual das 'suspensões ativas' (mesmo que não fossem tão ativas) e os estudos que estavam sendo realizados no mundo a respeito. Em seguida, buscou-se uma solução praticável e de resposta satisfatória, que pudesse ser instalada num veículo. Essa solução foi então desenvolvida em uma forma ideal, como sendo o 'estado da arte' desse tipo de suspensão, e depois para a construção de um modelo foram feitas diversas simplificações, principalmente para redução de custo.

Uma dificuldade adicional foi conseguir material sobre o assunto, já que é um tema recente e com um volume de informações bem menor que temas tradicionais (por exemplo controle de motor). As indústrias também apresentam suas pesquisas com certa reserva, pois muitas vezes elas ainda são confidenciais e não lançadas.



## HISTÓRICO DA SUSPENSÃO ATIVA

No ano de 1968 foram dados os primeiros passos na direção da pesquisa e implementação de uma suspensão dita ativa. No ano seguinte os primeiros modelos matemáticos foram apresentados por *Bender*. Em 1973 o conceito do amortecedor de coeficiente de amortecimento variável foi apresentado pela dupla de pesquisadores *Crosby* e *Karnopp*. Este último pesquisador em 1984 em conjunto com *Margolis* estudaram os efeitos da alteração dos parâmetros da suspensão automotiva. Com isto avaliaram as alterações nas respostas com relação a:

- ressonância;
- ponto de inflexão;
- redução da transmissão de velocidades.

No ano seguinte, como já era de esperar, a Fórmula 1 se interessou pelas descobertas e os pesquisadores *Dominy* e *Bulman* foram trabalhar para a escuderia LOTUS. Neste mesmo ano, *Hamilton* introduziu a idéia da suspensão adaptativa que muda suas características funcionais durante sua solicitação.

*"... pitch, heave and holl control (...). Depending on the road and drive conditions, suspension gains are changed to maximize a given definition of suspension performance."*

*"... controle de mergulho, erguimento da frente e rolagem (...). Dependendo das condições da estrada e de condução os ganhos do controle da suspensão são modificados de modo a melhorar a performance."*

A maneira como se variava os parâmetros da suspensão era através da utilização de elementos ajustáveis:

- volume variável das molas pneumáticas;
- orifício variável dos amortecedores hidráulicos;
- ganho variável dos atuadores (gerado por atuadores hidráulicos ou elétricos).

Ao final do ano de 1985 um grupo de pesquisadores, entre eles Yeh, Mizuguchi, Hamilton, Cheok e Sugasuawa, apresentaram modelos de suspensões controladas por microprocessadores onde um amortecedor era o elemento de controle.

Desta data em diante as pesquisas nesta área foi captada pela iniciativa privada, restringindo as publicações deste assunto. Nos dias de hoje quase todas as montadoras do mundo mantêm pesquisas neste tópico.

## ESTUDO DA NECESSIDADE

Desde o lançamento dos primeiros automóveis, suas fábricas vêm se esforçando para melhorar a qualidade de seus produtos. Esta evolução se dá principalmente visando enriquecer aspectos vitais que levarão o comprador a seu modelo. Simplificando, poderia-se dizer que, pelo menos até a metade do século, esses aspectos seriam o desempenho, conforto, e a segurança dos veículos automotivos. Durante décadas o item desempenho significava praticamente velocidade: construiu-se carros com enormes motores, boas velocidades em retas, mas devido à precária estabilidade, estes carros não se comportavam bem em curvas (vide apêndice). O objetivo principal de uma suspensão era o conforto. Com o lançamento de carros essencialmente esportivos, destinados a uma faixa distinta de público, percebeu-se que o conforto, no que depende da suspensão, ficava e ainda hoje fica prejudicado (o desempenho de um automóvel nas curvas melhorou, com o ônus de se endurecer a suspensão).

Com um consumidor cada vez mais exigente, o mercado automobilístico se torna mais complexo com a inclusão de muitos mais fatores dentro dos simplificados aspectos vitais desempenho, conforto e segurança. Dentro do conceito de desempenho incluiu-se, além dos itens mais óbvios como velocidade, aceleração, retomadas, a estabilidade nas curvas, refletindo diretamente no fator segurança, o conceito de potência específica, o consumo relativo à capacidade do motor, etc. Dentro da segurança, as evoluções fizeram uma revisão neste conceito: desenvolvimento de novos materiais, novos chassis mais leves e resistentes (refletindo no desempenho), materiais não inflamáveis ou com baixa propagação de chama, freios antiblocantes, vidros temperados e laminados, almofadas de ar (air-bags), "santo-antonios" retráteis em carros



conversíveis, faróis mais potentes, etc. No fator conforto, apareceram câmbios automáticos, direção hidráulica, revestimentos acústicos, estudos de vibração do elementos do sistema de escape, estudos ergométricos, possibilidades de regulagens de posição em bancos e direção (inclusive regulagem com motores elétricos e memória da posição destes para cada usuário do carro), sistemas de ar-condicionado, vidros escurecidos ou até que, dependendo da luminosidade externa, mudam sua transparência, piloto automático para estradas, painel digital, sistemas de som avançadíssimos, etc. Apareceram novas preocupações, como a poluição ambiental - emissão de gases, nível de ruído e reciclagem de materiais.

O automóvel deixou de ser somente um símbolo de status, mas é inegável que boa parte do público procura ainda conciliar o automóvel "meio de transporte" com o automóvel "status". Os veículos esportivos e de luxo terão sempre seu público, inclusive com uma nova tendência de se conciliar esses dois tipos de automóveis, e torná-los cada vez mais acessíveis à grande maioria de compradores.

A avaliação de um automóvel é sempre uma média entre estes principais fatores, que altera seus pesos de cliente para cliente. Entretanto, a segurança por si só torna-se o fator dominador, principalmente na questão estabilidade e freios, a exemplo das fábricas BMW, Volvo, Scania e Mercedes, cujo principal enfoque de marketing é a segurança (apêndice no final do capítulo). O desenvolvimento de tecnologias aliando a mecânica à eletrônica, ou melhor, sistemas mecânicos a controles eletrônicos, proporcionou avanços nas áreas de gerenciamento de motores, conforto, e permitiu um especial avanço na área de segurança.

Na idéia de sensibilizar o consumidor através da comprovada eficiência no que tange a segurança, surge o sistema de Suspensão Ativa. Com a

utilização deste equipamento, além da proteção assegurada ao usuário, garantida pela maior dirigibilidade do veículo, há de se ressaltar a melhoria do sistema de suspensão em relação ao desgaste do automóvel, tanto das partes internas (que sofrerão menos choques e vibrações indesejáveis), como dos pneus e rodas que estarão rodando sempre de forma adequada.

No mercado nacional já ocorreu o lançamento de um sistema de suspensão ativa em um carro de série, apresentando apenas regulagens restritas (apêndice no final do capítulo).

No mercado internacional este equipamento já é disponível em vários dos automóveis de luxo e esporte (apêndice no final do capítulo). O mercado caminha para uma utilização em larga escala, visto a grande receptividade do público consumidor. Muitos carros japoneses já sairão equipados com Suspensão ativa no próximo ano.

Devido às características do mercado de automóveis do mercado nacional, o projeto de uma suspensão ativa se destina, atualmente, apenas a carros esporte e de luxo. No futuro, seria desejável a aplicação deste equipamento em todos os segmentos do mercado, medida que seria possível graças ao barateamento contínuo dos componentes eletrônicos e o natural amortizamento dos investimentos necessários à implantação deste equipamento.

## ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Os veículos atualmente requerem cada vez mais uma melhoria na dirigibilidade e na segurança, e o sistema de suspensão aliado a tecnologia eletrônica se torna parte indispensável deste conjunto.

Desta forma, para aquisição de tais melhorias as seguintes especificações são desejadas :

### ESPECIFICAÇÕES FUNCIONAIS :

#### a) DESEMPENHO

##### Manter horizontalidade do veículo.

Em situações como acelerações bruscas ou em frenagens (nose dive) deve-se manter o veículo em posição mais horizontal possível atuando na suspensão de cada roda. O mesmo efeito deve ter em curvas, atuando-se agora, mais nas rodas externas e menos na suspensão das rodas internas à curva, mantendo sempre a horizontalidade com o chão.

##### Manter a distância do solo original.

Indiferente da carga que se coloque no veículo como número de passageiros ou bagagens, o veículo deve possuir uma memória da posição original para que o sistema sempre se posicione a uma altura pré-determinada.

##### O funcionamento deve ser proporcional à velocidade.

Em velocidades cada vez mais altas deseja-se um sistema de suspensão mais rígido enquanto que na locomoção pela cidade com paradas e desacelerações frequentes o sistema deve ser mais mole. Esta variação de

velocidade deve proporcionar mudanças na atuação do sistema de suspensão ativa.

*redução*  
Otimizar a transmissão de choques para a carroceria.

Deve-se sempre fazer com que o sistema de suspensão absorva os choques com a pista de forma que a carroceria seja pouco afetada. O ideal seria que o  $k$  de amortecimento se tornasse cada vez menor, suavizando ao máximo, provocando uma flutuação do veículo; mas tal fato é tecnicamente impossível.

#### b) SEGURANÇA

Na falha do sistema, garantir a segurança do usuário.

Em quaisquer situações de pane no sistema deve-se evitar respostas e ações incorretas garantindo a segurança do usuário. Em condições de perigo como frenagens bruscas ou curvas muito fechadas o sistema não deve operar com valores incoerentes com a situação.

#### c) ACIONAMENTO

Fácil visualização e acionamento

No painel de controle o sistema de suspensão ativa deve ser de fácil acionamento sem que o usuário tenha de tirar a mão do volante por muito tempo e deve apresentar uma visualização clara e de fácil compreensão. Em situações irregulares, o painel deve mostrar ao usuário alguma indicação do mau funcionamento de forma fácil e sucinta.

Comando ao usuário não sobreporão as condições de segurança.

No instante de condições não normais, o usuário não poderá alterar as condições do sistema por motivo de segurança, por exemplo, em caso



de frenagens bruscas quando se está em alta velocidade, o usuário não poderá amolecer mais a suspensão; e o sistema atuará independentemente da escolha do usuário.

O sistema deve possuir algumas posições que o próprio usuário escolherá entre um amortecimento mais mole ou mais duro.

Fica a critério do usuário, a escolha de um tipo de suspensão ativa seja ela mais amortecida ou mais rígida. No entanto, em situações de alta velocidade, embora se tenha escolhido uma suspensão mais mole o sistema endurecerá gradativamente por questão de segurança.

### ESPECIFICAÇÕES OPERACIONAIS.

#### a) DURABILIDADE

Deve possuir a durabilidade do veículo.

O sistema de suspensão deve ser compatível com aproximadamente, a vida do veículo que fica algo em torno de 150 mil km.

#### b) CONFIABILIDADE

Garantia do veículo

O sistema deve ser garantido até as primeiras revisões dos veículos (5 a 10 mil km).

#### c) MANUTENÇÃO

Teste periódico do sistema

Os componentes eletrônicos devem estar em constantes verificações para que se detecte alguma forma de anormalidade no sistema. A cada período o controlador através de um sistema de check deve varrer o sistema



para procurar possíveis erros. Caso constate alguma anormalidade devidas atitudes deverão ser tomadas.

#### Verificação de falha

Caso alguma falha aconteça, um sinal luminoso no painel deve informar o usuário.

#### Manutenção periódica.

A cada revisão do veículo, que é de aproximadamente 10 mil km, deve se verifica todo o sistema de suspensão tanto a parte mecânica quanto a eletrônica.

### ESPECIFICAÇÕES CONSTRUTIVAS.

#### a) PESO

##### Peso máximo do sistema

O sistema deve pesar no máximo, algo em torno de 50 Kg. Este peso não afetaria significativamente o peso total do veículo, mesmo porque partes da suspensão original serão retiradas, aliviando o veículo ainda mais.

#### b) DIMENSÃO

##### Não alterar significativamente as dimensões originais.

As dimensões básicas dos veículos não devem ser alterados para que este não afete a geometria da suspensão original.

## FUNDAMENTOS DA DINÂMICA DE VEÍCULOS

Pode-se, atualmente, encontrar maiores facilidades no desenvolvimento de um projeto deste tipo devido ao enorme avanço nos campos dos computadores e sensoreamento. Apesar disso, é fundamental que o movimento e comportamentos de um veículo sejam completamente descritos para que, mais tarde, um sistema de controle da suspensão ativa possa ser projetado de acordo o tipo de resposta, qualitativamente e quantitativamente. Será descrito, nas páginas adiante, o comportamento dinâmico de um veículo, visando essa posterior boa estimativa nas respostas da suspensão a ser projetada.

### RIDE (MOVIMENTAÇÃO EM LINHA RETA)

Um corpo rígido livre no espaço exige 6 coordenadas para uma total descrição de seu movimento. Como um automóvel possui três massas principais (chassis e suspensões dianteira e traseira), seria necessário um sistema de dezoito equações diferenciais para uma completa descrição de seu movimento. É claro que, feitas as devidas simplificações, tanto no tocante à limitações nos movimentos das suspensões quanto hipóteses adotadas em modelos, reduzirão este número.

Quando uma evolução no conforto humano é desejado, sob condições específicas, deve-se então incluir em um estudo para tal as massas dos passageiros. Isto torna ainda mais complexo o sistema de vibrações, visto que molas não-lineares podem vir a ser usadas. Amortecedores e molas de comportamento não-linear são frequentemente usados em projetos por que suas características de frequência variável os tornam dispositivos eficientes de isolamento de vibrações quando há grande variação de massa no sistema.

Considerações sobre conforto e algumas hipóteses sobre aspectos construtivos do veículo são feitas no capítulo sob o título 'CONFORTO'.

Realizar-se-á neste item o desenvolvimento dos modelos, descrição dos movimentos, formulação e considerações sobre os possíveis modelos teóricos controlados.

O modelo adotado possui suspensão independente nas quatro rodas, semelhante aos modelos mais modernos produzido atualmente.

A representação esquemática do modelo e a terminologia que será utilizada no desenvolvimento deste trabalho são apresentadas abaixo:

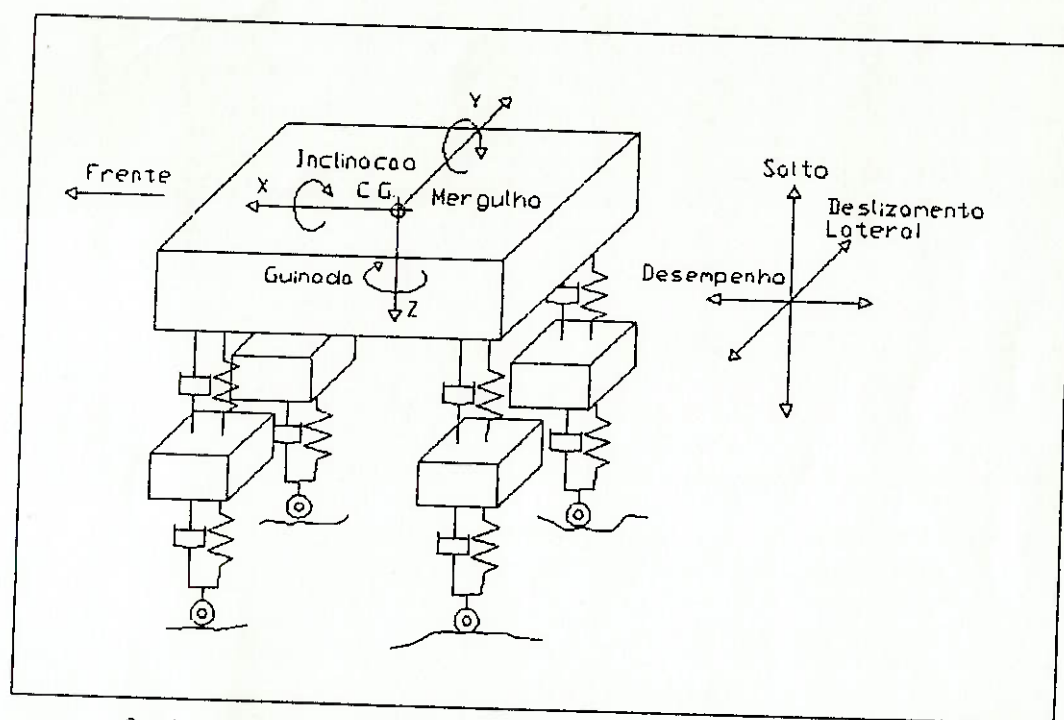


fig.1 - Modelo Teorico e Nomenclatura de Movimentos

A tabela a seguir mostra a terminologia usada no projeto com todos os movimentos do veículo. Na tabela 1, *Trans.* indica translação no sentido do eixo e *Rot.* indica rotação em torno do eixo.

	Modos do Movimento	Chassis	Suspensão
Translação	eixoX	Desempenho	Arraste
	eixoY	Deslizamento lateral	Arraste lateral
	eixoZ	Salto	Salto na roda
Rotação	eixoX	Inclinação	Mudança de camber
	eixoY	Mergulho	Mudança de câster
	eixoZ	Guinada	Mudança de braço

Tabela 1 - Terminologia

Desempenho é concebido como os movimentos posteriores e antecessores do veículo em um instante de tempo em seu plano XZ de simetria. Inclui aceleração, frenagem e velocidade do veículo, requerendo então o acionamento dos pedais de freio e acelerador.

Estabilidade e Controle trata com guinadas, inclinações e deslizamentos laterais, que são movimentos fora do plano de simetria. Estes fatores não incluem o motorista como parte do sistema.

Dirigibilidade engloba os movimentos acima, no entanto, em conjunto com outros fatores de entrada como condições de pista, atmosféricas, etc.. Refere-se às respostas do sistema como um todo, sendo portanto do tipo objetivas e subjetivas.

A movimentação em linha reta se compõe de mergulho (que pode ser para frente ou para trás) e do movimento vertical do chassis (salto).

Considerando estes últimos movimentos, pode-se considerar um modelo em duas dimensões:

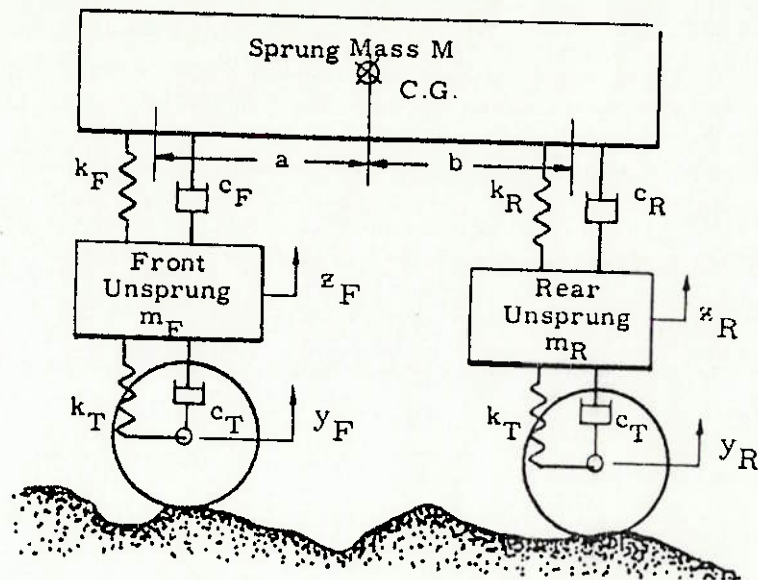


fig.2 - Modelo bidimensional

Para o modelo bidimensional, as duas suspensões dianteiras são tomadas como uma só, funcionando em paralelo no mesmo ponto, conforme [1]. O mesmo pode ser considerado para as suspensões traseiras. A rigidez da mola e o amortecimento equivalentes para esta simplificação são dados por:

Em cada suspensão:

- Rigidez: pneu em série com a mola:

$$k_s = \frac{k_{\text{mola}} \cdot k_{\text{pneu}}}{k_{\text{mola}} + k_{\text{pneu}}}$$

- Amortecimento: pneu em série com o amortecedor:



$$C_s = C_{\text{amort}} + C_{\text{pneu}}$$

- suspensões em paralelo:

- Rigidez equivalente:  $K_{eq} = 2 \cdot K_s$

$$k_{eq} = 2 \frac{k_{\text{mola}} \cdot k_{\text{pneu}}}{k_{\text{mola}} + k_{\text{pneu}}}$$

- Amortecimento equivalente:

$$c_{eq} = \frac{(c_{\text{amort}} + c_{\text{pneu}})}{2}$$

### MODELO MATEMÁTICO DE QUATRO GRAUS DE LIBERDADE

Chamando:

$z$  - aceleração da massa suspensa.

$J$  - momento de inércia da massa suspensa.

$z_f$  - aceleração da massa não suspensa dianteira

$z_r$  - aceleração da massa não suspensa traseira

$k_f, k_r$  - rigidez da mola das suspensões dianteira e traseira

$k_t$  - rigidez do pneu

$c_f, c_r$  - amortecimento das suspensões dianteira e traseira

$c_t$  - amortecimento do pneu

$y_f, y_r$  - entrada do sistema, representam condições da pista

$a, b$  - posição das rodas dianteira e traseira em relação ao C.G.

No modelamento adotou-se o movimento das rodas somente como vertical (por hipótese).

As equações que regem o movimento são:

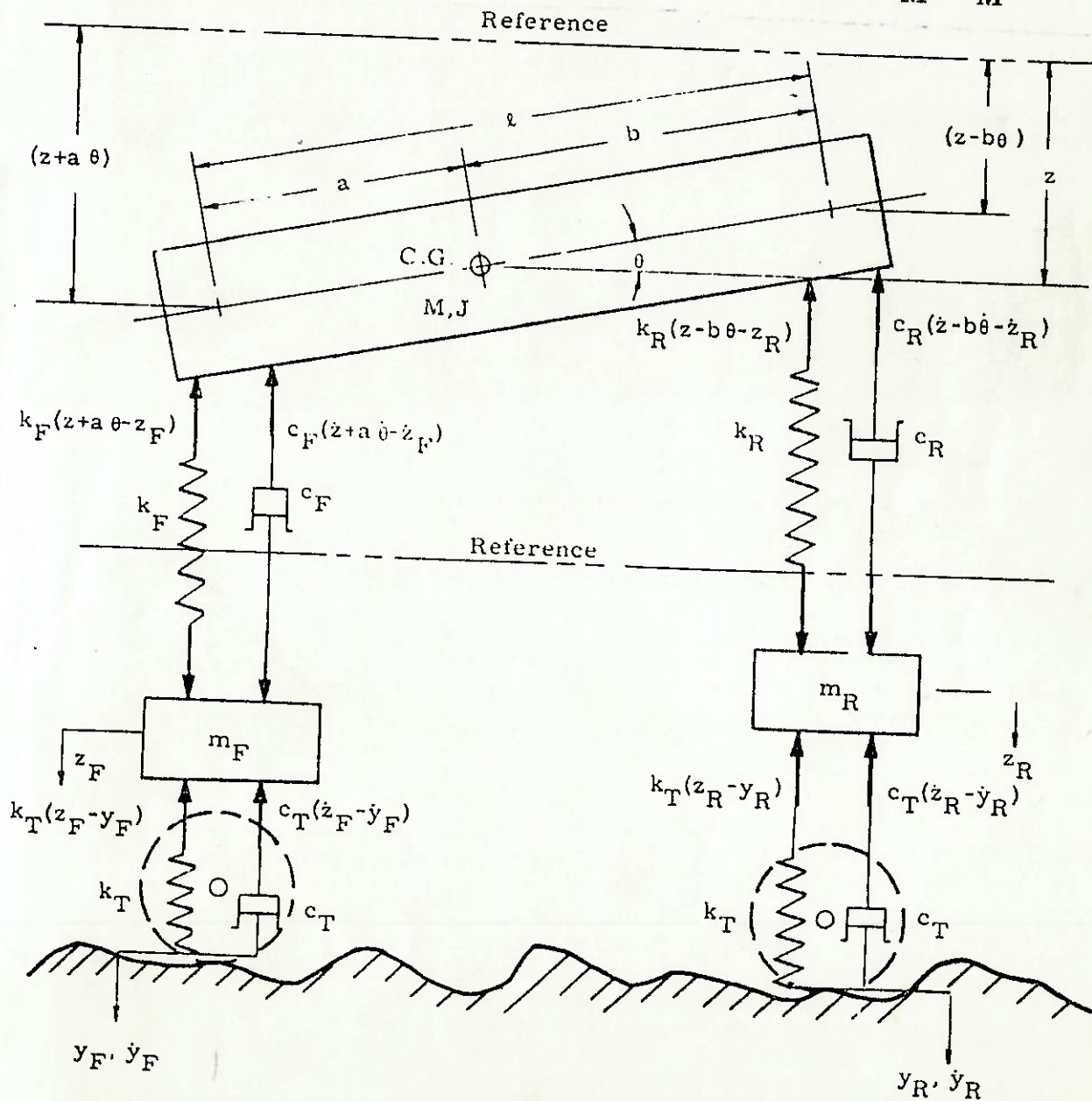
## Salto (movimento vertical) da massa suspensa

$$F_M = M\ddot{Z}$$

$$-k_f \cdot (z + a \cdot \theta - z_f) - c_f \cdot (\dot{z} + a \cdot \dot{\theta} - \dot{z}_f) - k_r \cdot (z - b \cdot \theta - z_r) - c_r \cdot (\dot{z} - b \cdot \dot{\theta} - \dot{z}_r) = M \ddot{z}$$

ou:

$$\frac{(c_f + c_r)}{M} \dot{z} + \frac{(k_f + k_r)}{M} z + \frac{(a \cdot c_f + b \cdot c_r)}{M} \dot{\theta} + \frac{(a \cdot k_f + b \cdot k_r)}{M} \theta - \frac{c_f}{M} \dot{z}_f - \frac{k_f}{M} z_f - \frac{c_r}{M} \dot{z}_r - \frac{k_r}{M} z_r = 0$$



## Mergulho da massa suspensa

$$T_M = M \ddot{\theta}$$

$$-k_f \cdot a \cdot (z + a \cdot \theta - z_f) - c_f \cdot a \cdot (\dot{z} + a \cdot \dot{\theta} - \dot{z}_f) + k_r \cdot b \cdot (z - b \cdot \theta - z_f) + c_r \cdot b \cdot (\dot{z} - b \cdot \dot{\theta} - \dot{z}_f) = J \ddot{\theta}$$

ou:

$$\ddot{\theta} + \frac{(a^2 c_f + b^2 c_r)}{J} \dot{\theta} + \frac{(a^2 k_f + b^2 k_r)}{J} \theta + \frac{(a \cdot c_f + b \cdot c_r)}{J} \dot{\theta} + \frac{(a \cdot k_f + b \cdot k_r)}{J} \theta + \frac{a \cdot c_f}{J} \dot{z}_f + \frac{a \cdot k_f}{J} z_f + \frac{b \cdot c_r}{J} \dot{z}_f + \frac{b \cdot k_r}{J} z_f = 0$$

## Salto (movimento vertical) da massa não-suspensa dianteira

$$F_{mf} = m_f \cdot \ddot{z}_f$$

$$-k_f \cdot (z - y_f) - c_f (\dot{z} - \dot{y}_f) + k_r \cdot (z + a_0 - z_f) + c_r (\dot{z} + \dot{a}_0 - \dot{z}_f) = m_f \cdot \ddot{z}_f$$

ou:

$$\ddot{z}_f + \frac{(c_f + c_r)}{m_f} \dot{z}_f + \frac{(k_f + k_r)}{m_f} z_f + \frac{c_f}{m_f} \dot{z} + \frac{k_f}{m_f} z - \frac{a \cdot c_f}{m_f} \dot{\theta} + \frac{a \cdot k_f}{m_f} \theta + \frac{c_r}{m_f} \dot{y}_f + \frac{k_r}{m_f} y_f = 0$$

## Salto (movimento vertical) da massa não-suspensa traseira

$$F_{mr} = m_r \cdot \ddot{z}_r$$

$$-k_r \cdot (z - y_r) - c_r (\dot{z} - \dot{y}_r) + k_f \cdot (z + b_0 - z_f) + c_f (\dot{z} + \dot{b}_0 - \dot{z}_f) = m_r \cdot \ddot{z}_r$$

ou:

$$\ddot{z}_r + \frac{(c_f + c_r)}{m_r} \dot{z}_r + \frac{(k_f + k_r)}{m_r} z_r + \frac{c_f}{m_r} \dot{z} + \frac{k_f}{m_r} z - \frac{b \cdot c_r}{m_r} \dot{\theta} + \frac{b \cdot k_r}{m_r} \theta + \frac{c_f}{m_r} \dot{y}_f + \frac{k_f}{m_r} y_f = 0$$

Note que o modelamento acima foi feito levando em conta somente as molas e amortecedores em paralelo, e o pneu foi considerado à parte.

Em uma descrição mais simplificada, com as massas não suspensas sendo desprezadas, utilizaria-se então o conceito de  $K_{eq}$  e  $C_{eq}$  mostrados anteriormente.

Destas equações podemos tirar facilmente as frequências naturais, que serão importantes no controle da suspensão:

**Salto (movimento vertical) da massa suspensa**

$$W_{nB} = \sqrt{\frac{k_f + k_r}{M}}$$

**Mergulho da massa suspensa**

$$W_{nP} = \sqrt{\frac{a^2 \cdot k_f + b^2 \cdot k_r}{J}}$$

**Salto (movimento vertical) da massa não-suspensa dianteira**

$$W_{nHF} = \sqrt{\frac{k_f + k_t}{M_f}}$$

**Salto (movimento vertical) da massa não-suspensa traseira**

$$W_{nHR} = \sqrt{\frac{k_t + k_r}{m_r}}$$

Transformando as equações do movimento do veículo em equações de estado, será possível simular, para vários tipos de entrada (simula o perfil do pavimento a que o veículo estará sujeito, podendo ser senoidal, tipo degrau, liso ou até mesmo uma valeta ou ressalto na pista), através do programa MatLab (capítulo 'SIMULAÇÃO').

No projeto, inicialmente assumir-se-á que  $k_f$ ,  $k_r$ ,  $c_f$  e  $c_r$  poderão ser controlados, fazendo uma análise da resposta (do veículo como um todo) para os vários valores desses parâmetros.

As formas de se controlar estes parâmetros será feito das seguintes maneiras:

1. Para a rigidez da mola:

- Uso de uma mola controlada em paralelo:

$$k_f = k_{mola\_original} + k_{mola\_controlada}$$

$$k_r = k_{mola\_original} + k_{mola\_controlada}$$

- uso de uma mola controlada em série:

$$k_f = \frac{k_{mola\_original} k_{mola\_controlada}}{k_{mola\_original} + k_{mola\_controlada}}$$

$$k_r = \frac{k_{mola\_original} k_{mola\_controlada}}{k_{mola\_original} + k_{mola\_controlada}}$$

2. Para o amortecimento:

- Uso de um amortecimento controlado em paralelo:



$$C_r = C_{mola\_original} + C_{mola\_controlada}$$

$$C_r = C_{mola\_original} + C_{mola\_controlada}$$

— uso de um amortecimento controlado em série:

$$C_r = \frac{C_{mola\_original} C_{mola\_controlada}}{C_{mola\_original} + C_{mola\_controlada}}$$

$$C_r = \frac{C_{mola\_original} C_{mola\_controlada}}{C_{mola\_original} + C_{mola\_controlada}}$$

Além das combinações das opções anteriores, pode-se usar uma mola ou um amortecedor totalmente controlados, sem utilizar os originais (não controlados) do veículo.

Há ainda a possibilidade da utilização de um atuador hidráulico, onde os parâmetros  $k_f$ ,  $k_r$ ,  $c_f$  e  $c_r$  são controlados totalmente, isto é, não há nem molas nem amortecedores originais (não controlados). Pode parecer uma solução mais simples em termos de controle, mas é sofisticada em termos de exequibilidade física, e difícil de contornar quanto à questão de segurança (o veículo deve manter um comportamento que proporcione segurança quando da falha da suspensão ativa).

As respostas serão avaliadas segundo os padrões de conforto (capítulo 'CONFORTO'), desprezando-se, neste projeto, as molas e amortecimento dos assentos do veículo, e será escolhido o modelo teórico que proporcionar uma melhor gama de respostas.

Em paralelo com este estudo fez-se a elaboração de modelos físicos para cada modelo teórico, resultados apresentados no capítulo 'SIMULAÇÕES E MODELOS FÍSICOS'.

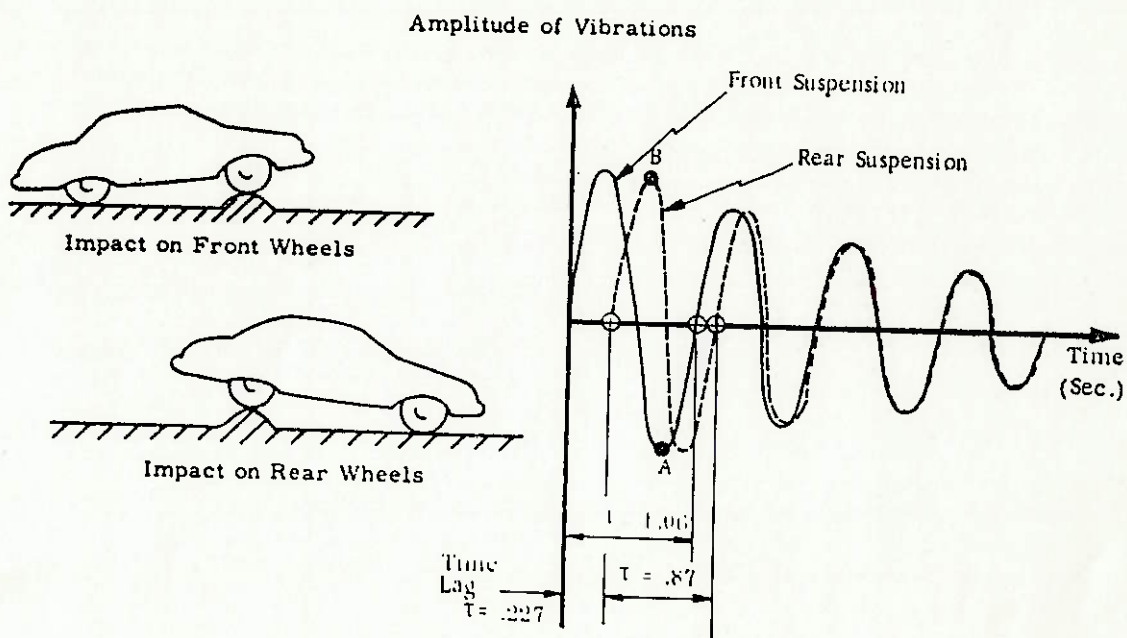
### MOVIMENTOS TRANSVERSAIS

No projeto do controle dos movimento transversais angulares, não será necessário descrever as equações que regem o movimento, visto que os movimentos inclusive dependem da geometria das suspensões dianteira e traseira contrariando o propósito deste projeto de aplicar a suspensão ativa projetada em veículos diversos.

Para o controle destes movimentos, será usado um servo-mecanismo que terá como referência a posição das rodas com o veículo em ordem de marcha e em piso plano.

## MOVIMENTAÇÃO PLANA

A discussão da situação ocorrida na ilustração a seguir explica muito bem este conceito:



Na ilustração, consideremos um veículo com velocidade de 12.1 m/s, atingindo um ressalto na pista. Considerando as características do veículo:

- Distância entre-eixos:  $l = 2.75$  m
- Localização do C.G.:  
 $a = 1.37$  m (C.G. até o eixo dianteiro)  
 $b = 1.68$  m (C.G. até o eixo traseiro)
- Raio de giração ao quadrado do veículo:  $r^2 = 2.30$  m<sup>2</sup>
- Massa do veículo:  $M = 1815$  kg
- Rigidez das suspensões+pneu:  
 dianteira:  $k_f = 35715$  N/m  
 traseira:  $k_r = 42860$  N/m

Analisando as equações que regem o movimento do veículo apresentadas no capítulo "FUNDAMENTOS DA DINÂMICA DE VEÍCULOS", e simplificando-as da seguinte forma:

- Eliminando as massas não suspensas (só se interessando pelo comportamento da massa suspensa - esta hipótese é válida pois as frequências naturais das massas suspensa e não suspensa são de ordem muito diferentes, da ordem de 1 Hz e 10 Hz, respectivamente);

- Eliminando as entradas do sistema (concentrando-se no transiente do movimento);

- Eliminando os termos de amortecimento (apesar da omissão desses termos privar o sistema do decaimento, qualitativamente isto permite uma satisfatória avaliação das respostas).

As equações tomaram a seguinte forma:

**Salto (movimento vertical) da massa suspensa**

$$\ddot{z} + \frac{(k_f + k_r)}{M} z + \frac{(a \cdot k_f - b \cdot k_r)}{M} \theta = 0$$

**Mergulho da massa suspensa**

$$\ddot{\theta} + \frac{(a^2 \cdot k_f + b^2 \cdot k_r)}{J} \theta + \frac{(a \cdot k_f - b \cdot k_r)}{J} z = 0$$

onde  $k_f$  e  $k_r$ : rigidez da mola combinada em série com o pneu para as suspensões dianteira e traseira, respectivamente.

Assumindo as soluções do sistema de equações acima como:

$$z = Z \cdot \cos(\omega t) \text{ e } \theta = \Theta \cdot \cos(\omega t)$$

e chamando:

$$A = \frac{(k_f + k_r)}{M}$$

$$B = \frac{(a.k_f - b.k_r)}{M}$$

$$C = \frac{(a^2.k_f + b^2.k_r)}{J}$$

temos:

$$-\omega^2 \cdot \ddot{z} \cdot \cos(\omega.t) + A \cdot \dot{z} \cdot \cos(\omega.t) + B \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\omega.t) = 0$$

$$-\omega^2 \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos(\omega.t) + \frac{B}{r^2} z \cdot \cos(\omega.t) + C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\omega.t) = 0$$

ou simplificando:

$$-\omega^2 \cdot \ddot{z} + A \cdot \dot{z} + B \cdot \dot{\theta} = 0$$

$$-\omega^2 \cdot \ddot{\theta} + \frac{B}{r^2} z + C \cdot \dot{\theta} = 0$$

A razão de amplitudes  $(\frac{z}{\theta})$  é:

$$\frac{z}{\theta} = \frac{B}{\omega^2 - A}$$

$$\frac{z}{\theta} = -\frac{C - \omega^2}{B} r^2$$

Destas relações obtém-se uma equação do 2º grau em  $\omega$ , cuja solução é:



$$(\omega_{1,2})^2 = \frac{(A+C)}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4}(A-C)^2 + \frac{B^2}{r^2}}$$

Quando, pela construção do veículo,  $r^2 = a \cdot b$  tem-se as seguintes relações:

$$\omega_1 = \omega_r = \sqrt{\frac{k_r}{M \cdot (a/l)}} = \sqrt{\frac{k_r}{M_r}}$$

onde  $M_r$  é a porção da massa suspensa sobre a suspensão traseira;

$$\omega_1 = \omega_f = \sqrt{\frac{k_f}{M \cdot (b/l)}} = \sqrt{\frac{k_f}{M_f}}$$

onde  $M_f$  é a porção da massa suspensa sobre a suspensão dianteira.

Isto significa que o veículo praticamente pode ser tratado como dois sistemas simples de frequências  $w_1$  e  $w_2$ , ou seja, as suspensões podem ser excitadas independentemente.

Além disso, os centros dos movimentos verticais (que não <sup>é</sup> uma translação pura pois as molas possuem rigidez diferentes) e do angular (mergulho) se posicionam sobre as rodas, configurando esta situação de independência entre as suspensões (figura seguinte).

Assim voltando ao exemplo temos:

$$w_f = 5.95 \text{ rad/s}, \quad w_r = 7.20 \text{ rad/s}$$

correspondendo a um período

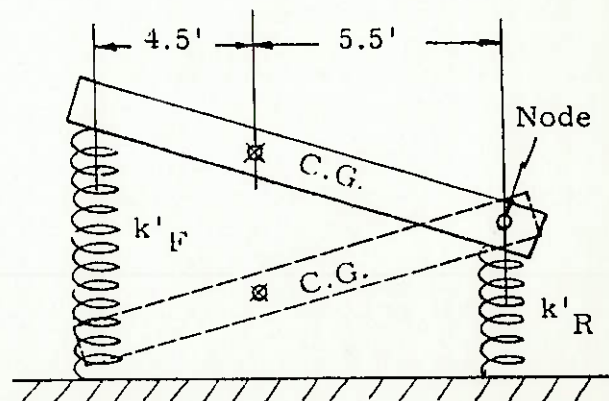
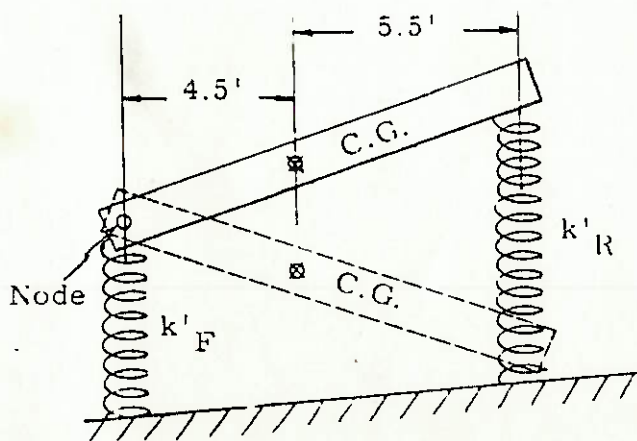
$$T_f = 1.06 \text{ s}, \quad T_r = 0.87 \text{ s}.$$

O tempo de atraso entre o impacto entre rodas dianteira e traseira é:

$$T_{\text{atraso}} = \frac{1}{v} = 0,227 \text{ s}$$

As oscilações podem ser tomadas como independentes, como observa-se no gráfico. Observa-se também que logo após as rodas traseiras passarem no obstáculo, o veículo enfrenta sua pior condição (pontos A e B), com a sua frente mergulhada e a traseira em seu ponto mais alto. Usando uma suspensão mais macia na frente, após 1 ciclo as extremidades passam a se mover em fase, o que é muito mais agradável <sup>para</sup> aos ocupantes. Controlar a frequência, amortecimento e a amplitude dessas oscilações é o objetivo deste projeto.

É essencial notar que este desenvolvimento teve como base a relação  $r^2 = a \cdot b$ , que é decorrente da construção do veículo, não importando qual a rigidez da suspensão dianteira ou traseira. Atualmente, os automóveis são construídos desta maneira ou com esta relação muito aproximada. Desta forma, mais uma hipótese a se adotar no projeto é que esta relação seja ou satisfeita ou muito próximo disso.



## CONFORTO

### INTRODUÇÃO

O conforto é uma noção de síntese que procura definir as condições do meio considerando a fisiologia do indivíduo. O conforto, que é um conceito bastante subjetivo, dependerá essencialmente de experiências práticas onde indivíduos avaliarão as condições a que estão sendo submetidos, sendo, portanto um conceito sujeito a fatores humanos.

O conforto depende principalmente das solicitações dinâmicas que provocam deslocamentos longitudinais, transversais, verticais e angulares com frequência e amplitude variáveis.

É claro que o banco onde está sentado o motorista (sua rigidez e amortecimento) influirá nesta sensação, mas a suspensão será o fator preponderante. Por isto desprezou-se o banco, tendo como hipótese que todos os movimentos do chassis serão os transmitidos ao indivíduo.

Através das experiências realizadas neste campo, chegou-se à conclusão de que as acelerações verticais são as que mais causam distúrbios (maior nível de desconforto) no homem. Considerando-se esta conclusão aliada ao fato de que a maioria dos movimentos do veículo são verticais (devido ao tipo de construção do veículo - ver item adiante: Movimentação Plana), apresentam-se a seguir os resultados dessas pesquisas quanto a movimentos verticais influenciando no conforto.

Os estudos limitaram-se à análise dos fatores aceleração máxima vertical, amplitude do movimento vertical, e frequência deste, característicos ao movimento vertical e a partir dos quais pode se traçar limites para conforto e

desconforto, fugindo do problema da subjetividade deste conceito (embora tendo consciência que os resultados não são aplicáveis a todos os indivíduos):

Sabendo que as respostas de uma suspensão são do tipo seno, temos a seguinte aceleração:

$$a = A \cdot \omega^2 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \beta)$$

para  $\text{sen}(\omega \cdot t + \beta) = 1$ ,  $a = a_{\max}$

$$a_{\max} = A \cdot \omega^2 = A \cdot (2\pi \cdot f)^2$$

onde

- A é a amplitude (m);
- $\omega$  é a frequência angular (rad/s);
- f é a frequência (Hz).

A frequência de oscilação será, portanto:

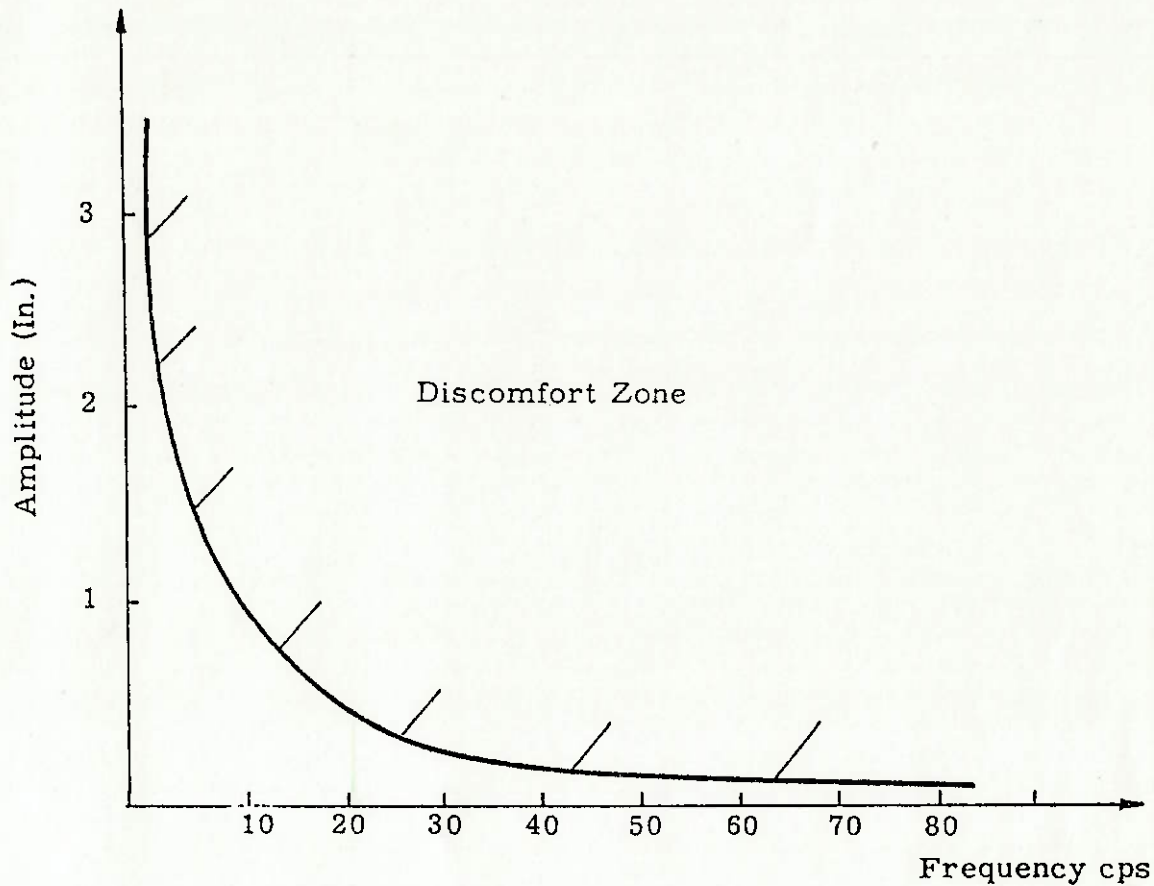
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{M}}$$

onde

- M é a massa suspensa;
- $k_{eq}$  é a rigidez equivalente mola + pneu.

### TOLERÂNCIA FISIOLÓGICA

Como resultado de várias experiências visando recolher informações sobre as sensações de pessoas submetidas a oscilações periódicas com frequência e amplitudes variáveis, foi possível estabelecer a seguinte curva:



Neste gráfico distingue-se as regiões de conforto e desconforto. Estes resultados foram obtidos por R.N. Janeway e já são tradicionais neste assunto. Esta curva pode ser aproximada pela expressão:

$$A \cdot f^3 = 5, f \text{ é a frequência (Hz);}$$

A é a amplitude ( $10^{-2}$  m)

Nota-se que para frequências baixas as amplitudes podem ser grandes, e para frequências altas requer-se amplitudes muito pequenas. Entretanto, outros fatores devem ser levados em consideração:



- Sabe-se, por outras experiências, que para o corpo humano sentado existe uma frequência de ressonância da ordem de 3 Hz ;
- Para frequências inferiores a 0.5 Hz, há perturbações neuro-vegetativas chamadas "mal dos transportes", perceptíveis pelo ouvido interno.

Delimita-se assim (grosseiramente) a faixa de frequências de oscilações da massa suspensas entre os valores 0.5 e 3 Hz.

Esta faixa será estreitada ao se observar que a suspensão deve também reduzir ao máximo as acelerações a que estão submetidos os ocupantes do veículo e cargas transportadas. Admite-se que a aceleração vertical não deve exceder  $0.25 \cdot g$  onde  $g$  é a aceleração da gravidade. Transportando este valor à expressão de  $a_{\max}$  anteriormente exposta, pode-se deduzir novos valores para os limites da faixa aceitável de frequências. Para o limite inferior, deve-se adotar valores entre 0.8 e 1 Hz.

De um modo geral, a frequência de oscilação da massa suspensa de um veículo deve ficar em torno de 1 Hz, com a amplitude máxima respeitada, que pode ser calculada (ou obtida através do gráfico anterior):

$$A_{\max} = \frac{5}{1^3} = 0,05m$$

o que corresponde a um curso da suspensão de 10 cm.

Deve-se observar que, para que estes limites sejam observados, a relação  $k_{eq} / M$  deve ser mantida dentro de um certo limite, pois faz parte da massa suspensa os ocupantes do veículo e eventuais cargas. Deve-se na suspensão ativa controlar o  $k_{eq}$  (através do  $k$  da suspensão) a fim de manter sempre esses padrões.

Além disso, com relação à amplitude, deve-se notar que independentemente de sua influência sobre a aceleração e a frequência, a deformação máxima da mola, quando o veículo passa por um obstáculo na pista, não deve exceder um determinado valor para evitar que o passageiro "salte" do banco. Portanto a aceleração que o impacto comunica à massa suspensa deve ser menor que a aceleração gravitacional, ou seja, a deflexão dinâmica (causada pelo choque com o obstáculo) deve ser menor que a estática (deformação causada pela massa suspensa com o veículo em repouso). Uma outra forma de se contornar este problema é com o controle do amortecimento na volta da suspensão ao estado inicial, não permitindo acelerações impróprias.

Poder-se-ia entrar ainda em outros campos como a influência da relação entre massa suspensa e massa não suspensa, mas não é esse o intuito dentro deste projeto. Nesse sentido, entretanto, destaca-se que esta relação influencia (junto com o amortecedor) diretamente a transferência de velocidades da massa não suspensa para a massa suspensa. Será preciso controlar o amortecedor convenientemente (pois não se controla a relação entre as massas) para evitar que o pneu perca o contato com o piso e evitar que a suspensão tenha características diferentes com o veículo carregado (massa suspensa grande) e não carregado.

Com relação aos movimento angulares longitudinais (Mergulho) percebeu-se que eles também causam uma sensação de desconforto. Este problema foi contornado, entretanto, com mudanças na construção do próprio chassis, através do conceito de 'Movimentação Plana' (Flat Ride), explanado a seguir.

## MODELO DA SUSPENSÃO A SER ADOTADO

O desenho do sistema de suspensão pode ter dois fatores básicos que influenciarão no seu desempenho. O primeiro fator importante é quanto ao isolamento das vibrações. Estes choques, num veículo automotivo, possuem uma larga faixa de atuação e o sistema de suspensão deve tentar anulá-lo o máximo possível para propiciar tanto um conforto ao passageiro quanto evitar que componentes no veículo se danifiquem. O segundo fator se refere ao itens como dirigibilidade e estabilidade que estão relacionados com a segurança tanto dos passageiros quanto do veículo.

Para se obter uma atuação que seja adequado a estes fatores, podem ser utilizados sistemas de suspensão que são basicamente subdividido em 3 categorias básicas. A suspensão pode ser: puramente passiva, semi-ativa e puramente ativa.

A suspensão passiva, encontrada na maioria dos veículos fabricados atualmente, é caracterizada por não possuir nenhuma fonte de energia que atue em quaisquer dos elementos passivos da suspensão. Este tipo de suspensão, por estes motivos, não são caros e possuem alto grau de confiabilidade. Estas são basicamente formadas por uma mola e um amortecedor telescópico hidráulico (simples ou dupla ação, pressurizados ou não).

A suspensão ativa tem por característica marcante o fato de reagir às ondulações do solo exatamente no mesmo instante em que ocorrem. Isto é conseguido através do sensoreamento antecipado do solo antes do seu encontro com a roda. Com isso a resposta do sistema global se torna quase que perfeita. Para cada irregularidade da pista a suspensão irá reagir de forma a manter o veículo nas melhores condições de conforto e dirigibilidade. As suspensões

ativas geralmente são implementadas apenas com um atuador hidráulico, dispensando o uso de amortecedores e molas. Esta suspensão necessita de fontes de energia. Esta energia pode ser adquirida pela implantação de elementos como bombas e atuadores. No entanto, embora este tipo de suspensão forneça uma resposta extremamente eficiente para a atuação no veículo, vários inconvenientes existem, fragilizando o sistema. Primeiramente, o sistema de sensoramento deve ser bastante sofisticado (do tipo radar). Outro fator negativo é quanto à confiabilidade do sistema que, perante qualquer falha de algum componente fornecedor de energia, o sistema não mais responde adequadamente (a menos que possua um dispositivo de segurança que retorna para um equipamento de suspensão passiva). Há ainda o inconveniente do sensor ser um equipamento bastante frágil. Aliados a todos estes fatores há o problema do custo de fabricação de todo este aparato que cerca a suspensão puramente ativa.

Podemos definir um sistema de suspensão que é um meio termo entre os modelos de suspensão que foram acima citados, ou seja, entre a suspensão puramente ativa e a puramente passiva. Esta suspensão será definida como sendo uma suspensão semi-ativa. Esta suspensão é um compromisso entre uma suspensão com alto desempenho com simplicidade de implementação. Este sistema deve possuir sensores espalhados em locais estratégicos do veículo para se ter uma análise do estado da pista e do veículo, que irão ser processados adequadamente, e enviar sinais aos elementos da suspensão para atuarem em diversas condições. No entanto estes sensores irão atuar somente para dar uma realimentação para o sistema e não como radares que iriam rastrear as condições da pista.

Para o modelo que irá ser adotado na suspensão deste projeto, se adotará uma suspensão semi-ativa, já que este é um sistema que preenche o vão



existente entre os modelos puramente ativos e passivos, que alia a simplicidade de implementação à um razoável desempenho, dando maior conforto e uma melhor dirigibilidade ao passageiro e estabilidade no veículo, ou seja uma maior segurança.

Os elementos passivos, tais como mola e amortecedor devem ser controláveis para que se possa atuar no conjunto da suspensão. Para a escolha de determinado elemento, este deve ser escolhido conforme a facilidade de alteração de suas constantes (rigidez  $k$  da mola e coeficiente de amortecimento  $c$ ) e a eficiência destes elementos em termos do tempo de resposta que se deve ter, pois a atuação em situações mais rigorosas requerem respostas mais rápidas e precisas. Não pode-se escolher elementos que não garantam estes parâmetros e que não sejam confiáveis para a suspensão. Desta forma, a escolha de um ou outro elemento será especificado no tópico a seguir.

### MATRIZ DE SOLUÇÕES

O sistema de suspensão ativa possui elementos básicos passivos que podem ser subdivididos em 2 grupos. Estes elementos são a mola e o amortecedor, e devem possuir alguma forma de variá-los, ou seja, cada elemento deve ser controlável alterando-se a rigidez  $k$ , no caso da mola, e o coeficiente de amortecimento  $c$  para os amortecedores.

A mola pode ser de vários tipos:

- mola helicoidal
- mola de feixes
- barra de torção
- mola pneumática

A mola de feixes e a barra de torção serão descartadas devido a sua dificuldade de controlá-los. Variar os apoios na mola de feixes para se obter



uma constante  $k$  adequada é um tanto inseguro além do espaço físico que ocupar ser grande. A barra de torção não seria aconselhado devido a esforços relativamente elevados que deverão ser suportados pelo elemento mola. No caso de querer se variar a constante de mola de uma barra de torção basta que o comprimento da barra a ser torcionado varie. No feixe de molas o que deve ser feito para controlar sua elasticidade é permitir que mais ou menos feixes sejam flexionados.

A mola pneumática possui bom desempenho neste tipo de exigências podendo ser um elemento de volume e peso relativamente pequenos, no entanto tem o inconveniente quanto ao seu custo. Além disto, deve-se instalar para este sistema, todos os acessórios como compressores, acumuladores, etc. A mola pneumática tem sua elasticidade regida pelo princípio da compressibilidade dos gases. Sua elasticidade pode ser variada através do aumento de pressão.

A mola helicoidal é o tipo mais utilizado nos atuais veículos com sistemas de suspensão convencionais. Sua elasticidade pode ser variada através da inserção de um 'parafuso' dentro da mola de modo a diminuir seu comprimento, aumentando assim sua rigidez. O problema deste tipo de mola ajustável é simplesmente construtivo.

O amortecedor poderá ser:

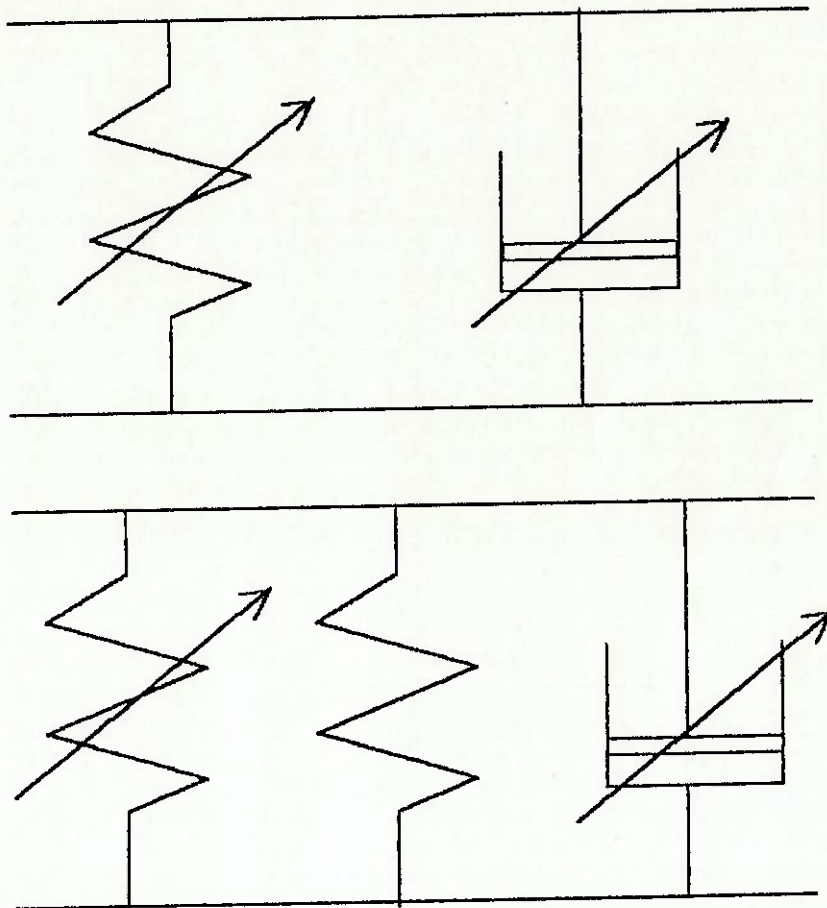
- atuador hidráulico
- coxim
- amortecedor hidráulico regulável

O coxim não poderá ser utilizado como amortecedor no nosso sistema de suspensão por não possuir uma forma prática de regulá-lo.

No caso dos atuadores hidráulicos, é necessário que se faça um sistema de sensoramento muito eficiente para enviar sinais ao controlador. Além

disto, há a questão da segurança do sistema quanto à perda da pressão de óleo, que irá prejudicar o funcionamento da suspensão.

Os amortecedores hidráulicos reguláveis têm por princípio de funcionamento a utilização de orifício de passagem de óleo regulável (discreta ou continuamente). Desta maneira é possível se modificar o comportamento do amortecedor, tornando-o mais duro ou o contrário.



Esquema de Disposições

Partindo da utilização de um amortecedor hidráulico regulável e uma mola pneumática, podemos abstrair duas disposições possíveis (outras disposições foram elaboradas porém descartadas em virtude de sua ineficiência).

A grande diferença entre elas é que, dependendo do tamanho do atuador da mola pneumática (no caso de ser muito pequeno), a força necessária à mola pode não ser atingida. Desta forma recorrer-se-ia a uma montagem onde uma mola helicoidal não ajustável aparece em paralelo com a mola pneumática regulável.

## O SISTEMA DE CONTROLE ELETRÔNICO

### INTRODUÇÃO

A grande Vantagem da 'suspensão inteligente' vem da capacidade de variar suas características conforme as necessidades de uso. Para gerenciar essa capacidade existe um sistema de controle central que compara informações colhidas de vários sensores, e decide qual o comportamento que a suspensão deverá tomar.

Até a década de '80 todos os controles existentes em um veículo eram mecânicos ou hidráulicos, como por exemplo a transmissão automática (conhecida por 'Hidramatic', que é o nome comercial de uma linha de transmissões da GM americana). Nesse sistema todo o controle é exercido por válvulas hidráulicas que executam as mudanças entre as diversas marchas.

O problema desses sistemas de controle é a baixa precisão do controle além do <sup>alto</sup> ~~baixo~~ tempo de resposta. *(Tempo de resposta grande)* Isso é inerente aos sistemas mecânicos, já que as constantes de tempo são altas.

A partir da década de '80, com a evolução da eletrônica embarcada, os sistemas de controle mecânicos perderam gradativamente o lugar para os circuitos eletrônicos. As vantagens dos circuitos eletrônicos são:

- grande capacidade de processar informações, permitindo que mais dados possam compor a saída;
- elevadas velocidades de processamento, muito mais altas que as de sistemas mecânicos equivalentes;
- baixa manutenção, pois quando quebram são substituídas completamente;
- ausência de peças móveis, que reduz a possibilidade de falhas no controle;

- baixo preço (atualmente, já que na época do lançamento isso nem sempre ~~era~~ ocorria);

Apesar dessas inúmeras vantagens, os sistemas de controle eletrônicos também apresentam algumas desvantagens, mas que estão sendo estudadas e cada vez mais são minimizadas:

- a confiabilidade dos sistemas eletrônicos ainda apresenta alguns problemas, pois algumas vezes o sistema apresenta falhas e deixa o motorista 'a pé';
- a robustez dos sistemas eletrônicos ainda está longe dos sistemas mecânicos, sendo mais sensíveis a condições adversas, como solavancos e altas temperaturas;
- há certos lugares onde os sistemas eletrônicos não podem ser utilizados, como sob a água e em lugares onde há fortes campos magnéticos.

Pode-se perceber que essas limitações são mais aplicáveis a utilizações adversas, como por exemplo em um Camel Trophy (competição fora-de-estrada), e não tanto em veículos de passeio em condições normais. Apesar dessas limitações, a eletrônica chegou para ficar, e cada vez mais estará presente nos veículos.

## AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

### Introdução:

Um sistema de controle eletrônico pode ser dividido em quatro partes principais:

- sistema de interface com o usuário;
- sistema de sensoriamento;
- unidade central de processamento;
- sistema de integração do controle eletrônico com o sistema mecânico;



Além desses sistemas principais, que serão detalhados a seguir, existem os sistemas auxiliares, como o de suprimento de energia, o de inicialização, o de auto-diagnóstico, etc.

#### Sistemas principais:

Os sistemas principais, como o próprio nome já diz, são os responsáveis pela parte principal de controle do sistema eletrônico. A eles ficam reservadas as funções relacionadas diretamente com o comportamento do sistema controlado, analisando as entradas e fornecendo ao sistema controlado as saídas desejáveis.

Até agora, tudo o que foi dito sobre sistemas de controles eletrônicos pode ser aplicado a qualquer área automotiva. A partir daqui concentrar-se-á no controle da suspensão ativa.

#### O sistema de interface com o usuário:

O usuário do veículo (motorista) deve ser informado sobre o comportamento do seu sistema de suspensão, bem como ter capacidade para direcionar as decisões tomadas pelo controle.

Os sistemas de interface usuário/máquina vem sofrendo uma gigantesca revolução nos últimos anos, com o desenvolvimento de um lado da ergonomia e do outro dos softwares, que cada vez mais buscam uma interface consistente e amigável, procurando deixar o usuário em uma situação confortável, e com uma sensação de domínio sobre a máquina, transmitindo-lhe segurança.

Neste tópico deve-se investir muita pesquisa, pois será o cartão de visitas da suspensão para o motorista. De nada valerá uma efficientíssima suspensão se o motorista não conseguir adaptá-la para a sua forma de utilização.

Deve-se ser coerente com a proposta da suspensão, e não tentar torná-la uma super-star no painel. Assim o "feedback" deve ser discreto, informando porém o necessário ao motorista.

O motorista deve poder escolher entre diversas características de resposta da suspensão de forma rápida, e que não desvie sua atenção do trânsito. Abaixo segue uma relação com os vários tipos de interface possíveis, com um resumo de suas qualidades positivas e negativas:

- *Botão deslizante* - Um botão que se move ao longo de um eixo, onde cada posição desse eixo seleciona uma das características da suspensão. A principal desvantagem é a falta de referência de posição para o motorista, que normalmente tem que olhar para o botão para verificar sua posição.
- *Botão giratório* - Um botão que gira ao redor de um eixo normal ao painel, onde cada posição angular representa uma das características escolhida. A grande vantagem desse sistema, além do baixo custo, é a facilidade com que o motorista percebe qual a posição escolhida, sem precisar olhar para o botão.
- *Um botão para cada posição* - É um método muito prático de seleção, já que o motorista seleciona diretamente a situação desejada, porém dificulta os ajustes relativos (quando por exemplo deseja-se uma suspensão um pouco mais dura que a atual) pois obriga o motorista a memorizar o estado atual, ou a olhar para o teclado para saber-lo. Além disso tem uma implementação mais sofisticada (e cara) que os botões mecânicos.
- *Dois botões, um para 'endurecer' e outro para 'amolecer'* - Permite uma boa seleção relativa, mas dificulta a seleção absoluta. Quando associado a um sistema com sons (um tom para cada posição) contorna parte do problema de seleção absoluto. Tem uma implantação mais cara.
- *Reconhecimento de voz* - É um prático sistema, pois o motorista poderia acessar a posição absoluta ou relativa de forma mais intuitiva e direta, além disso não precisaria tirar as mãos do volante. É entretanto um sistema muito caro e

complexo, de difícil implementação (tem certa dificuldade em reconhecer diversas pessoas, e de diferenciar sons externos dos comandos) além de muitas vezes ser acionado involuntariamente. Apesar dos problemas, será provavelmente o principal sistema de interface do futuro.

- *Totalmente automático* - O sistema não apresenta nenhum controle externo (ou excepcionalmente, um botão para levar o sistema à posição de segurança). Apesar de tornar mais 'transparente' a existência da suspensão ativa ao motorista normal, retira a sua capacidade de influenciar no comportamento da suspensão.

A partir dessas considerações, pode-se escolher o sistema com botão rotativo como o mais recomendável para o controle do usuário sobre o sistema. Deve-se entretanto prever uma futura instalação de sistema para reconhecimento de voz.

Além da escolha do estado da suspensão, seria interessante se o motorista tivesse mais dois botões de controle: um que executasse um auto-teste da condição do sistema de controle da suspensão e outro que passasse a suspensão para a posição de máxima segurança independente do estado atual, para que em situações de emergência essa mudança fosse bem rápida.

Além do controle do motorista sobre a suspensão, deve-se estudar como a suspensão avisará ao motorista sobre seu estado atual. Aqui deve-se tomar um cuidado todo especial para não super-valorizar a importância dessas informações.

Até hoje, os motoristas dirigiram normalmente sem nem tomarem conhecimento do que estava acontecendo com a suspensão. Não se pode de uma hora para outra encher o seu painel com uma infinidade de informações (luzinhas, gráficos, buzininhas) para lhe contar o que está acontecendo com a suspensão.

As informações devem ser passadas de forma clara, para que o motorista não precise desviar muito sua atenção, e harmoniosa com o restante do painel. A seguir tem-se uma lista com as principais formas de apresentar essas informações, e um comentário sobre elas.

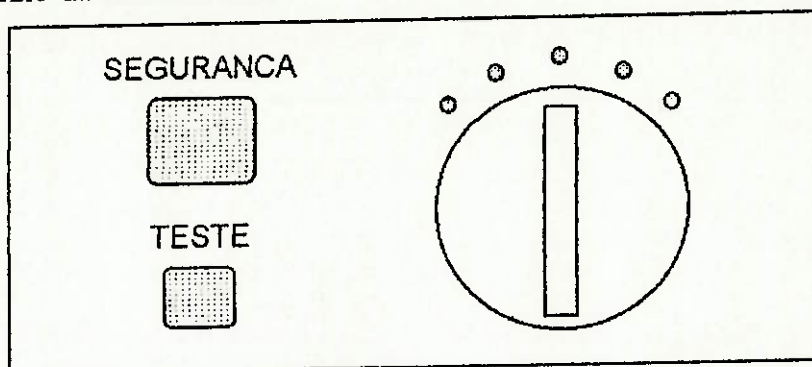
- *Gráfico de cores* - Um conjunto de LEDs (Diodos Emissores de Luz), são colocados em sequência, cada um representando um dos estados (o estado selecionado fica aceso). É eficiente quando os LEDs estão sobre a posição de seleção do botão.
- *Indicador digital* - Um número digital representa o estado selecionado. Tem a desvantagem de obrigar o motorista a ler o número, problema que é solucionado quando a cor do dígito varia com o estado.
- *Luzes chaves* - Apenas as funções chaves são apresentadas através de luzes-espia. Apesar de simplificar a apresentação, é de visualização extremamente rápida.
- *Sinal sonoro* - Um sintetizador de voz informa a situação da suspensão cada vez que indagado pelo motorista. Essa indagação pode ser também sonora, ou através de um botão. É uma implementação bem eficiente, ainda mais se acionada por voz, mas não pode dispensar o sinal visual, além de ser cara e 'não-natural' para o motorista atualmente.

A melhor solução para apresentação da situação da suspensão é uma combinação de Luzes Chaves com um pequeno LED sobre a opção selecionada.

As luzes chaves seriam: uma na tecla de segurança para indicar que ela está ativa (laranja); duas na tecla de auto-teste (vermelha e verde), durante o teste a vermelha ficaria piscando, após o teste se tudo estivesse 'ok' a verde ficaria acesa por 10 segundos, ou se houvesse algum problema, a vermelha ficaria acesa até que o motor fosse desligado.



A tecla de segurança deve ter prioridade de acionamento, uma das formas de favorecer isso, é fazer com que seu tamanho se sobressaia em relação ao tamanho da tecla de teste.



Esboço do Painel de Controle

O painel de interface deve permitir sua utilização facilmente também à noite. Para isso suas teclas são iluminadas em uma cor igual à dos instrumentos do painel, acompanhando inclusive a regulação de intensidade. Os estados não selecionados ficam iluminados com essa cor, enquanto o ativo terá uma iluminação destacada.

Na página anterior há um esboço desse painel de interface, com uma legenda dos seus componentes. É importante notar que não se está considerando a colocação de uma regulação de altura na suspensão. Esse controle seguiria o mesmo princípio do controle para seleção de estados descrito acima. Poderia-se colocar entretanto, apenas uma chave para a seleção entre 'Alto' e 'Baixo'.

#### O Sistema de Sensoriamento:

O sistema de sensoriamento é o conjunto de equipamentos que informa à central de controle a situação atual do veículo, para que sejam tomadas as decisões sobre como responder com a suspensão.



O princípio do controle da suspensão será a comparação da posição instantânea de cada uma das rodas com uma posição ideal, estabelecida após a determinação da situação na qual se encontra o veículo (por exemplo, uma <sup>n</sup>freagem a 60 km/h).

As principais características a serem medidas são o comportamento dinâmico e estático do veículo. Com essas informações pode-se determinar a situação atual do veículo a partir de uma combinação de um conjunto de situações básicas. A resposta ideal também será uma combinação das respostas básicas em cada situação.

Uma prévia do comportamento estático é obtida quando se liga o carro, a partir das diferentes alturas de cada roda. Isso é apenas uma medida inicial, que será atualizada a cada instante, pois o carro poderia estar parado em uma ladeira, o que levaria a uma falsa idéia de que ele estivesse carregado. Essa correção é atualizada a cada parada do carro, quando uma nova medição é realizada na altura das rodas, e em função dos dados atuais, dos dados de correção dinâmicos e das medidas anteriores, uma nova correção é calculada. Isto executa um controle do tipo integral na suspensão, onde um erro é corrigido ao longo do tempo.

A caracterização do comportamento dinâmico do veículo é conseguida com a medida da sua velocidade, aceleração longitudinal e aceleração lateral. A partir dessas informações, mais a massa do veículo e a posição do seu C.G. (Centro de Gravidade), pode-se determinar os esforços atuantes sobre cada roda, a assim controlar, por exemplo, a constante elástica das molas para nivelar o veículo.

e o  
mem.  
de  
IN.

Entretanto um acelerômetro é um equipamento muito caro, e para evitar sua instalação no veículo utiliza-se de alguns recursos de medida indireta,

substituindo esses sensores por outros mais simples, dos quais pode-se calcular o valor da aceleração.

Instalando-se um medidor de velocidade digital no veículo, pode-se também medir a aceleração, pela diferença entre medidas consecutivas. A aceleração lateral pode ser medida indiretamente pela posição do volante (que fornece o raio da curva que o veículo está fazendo) e a velocidade do carro. Assim pode-se medir o comportamento dinâmico do veículo através de um sensor de velocidade e um sensor de posição, que sai muito mais barato que acelerômetros. A perda de precisão pelas medidas indiretas é perfeitamente aceitável, já que a resposta dos amortecedores será discreta e com uma resolução baixa.

Para complementar esses sensores, um sensor no pedal do freio indica quando o veículo está freando, para diferenciar uma freagem de uma redução de velocidade. Além disso um sensor de pressão do circuito de freio fornece a característica da freagem desejada pelo motorista. Maior pressão, freagem mais forte. Isso serve para selecionar uma entre várias curvas de freagem.

Se se medir a velocidade com que o volante é virado, ou a velocidade com que o pedal do acelerador é movimentado, pode-se ter uma idéia do que vai acontecer com o carro nos instantes seguintes e assim adaptar os sinais de controle para que estejam atualizados no momento em que chegarem aos elementos da suspensão. Essas medidas podem ser conseguidas a partir da diferença entre medidas sucessivas da posição do volante, e a partir de um sensor de posição no pedal do acelerador. Essas medidas fornecem dados para um controle do tipo derivativo na suspensão, onde um erro futuro é estimado pela variação do erro atual.

Sensores de posição em cada suspensão, informam à unidade de controle qual a posição atual de cada roda, para compará-la com a posição ideal, fechando assim o loop de controle.

Todos esses sensores devem fornecer dados que possam ser processados pela unidade de controle. As medidas de derivadas (velocidade de rotação do volante, por exemplo são calculadas pela própria unidade, a partir de valores em instantes seguidos. A discussão sobre a faixa de precisão e resolução dos valores retornados pelos sensores serão discutidas posteriormente, depois de definida o tipo da unidade de controle.

Pode-se sofisticar o sensoriamento para a aquisição de dados que contribuam para determinar com mais precisão qual a situação atual do veículo. Esse sensoriamento pode ser considerado supérfluo para a proposta desta suspensão, pelo menos no estado atual. Deve-se prever entretanto a possibilidade de conexão desses equipamentos quando da especificação da unidade de controle.

Um sensor de inclinação da carroceria em relação à horizontal serve para oferecer parâmetros para a manutenção do carro em uma mesma posição sempre. O grande problema é que não se pode usar sensores como os de veleiros, que são basicamente um peso fixo numa articulação ou uma bolha num líquido, pois esse sensor não deve ser influenciado pelas curvas do veículo. O princípio de funcionamento deve ser semelhante aos giroscópios de aeronaves.

Sensor de rotação do motor e sensor de marcha engatada. São sensores simples (o de rotação do motor é retirado diretamente do polo negativo da bobina) que fornecem uma estimativa do comportamento do motorista, já que rotações mais elevadas indicam normalmente um dirigir mais agressivo (é lógico

que pode sempre ser a senhora que não sabe que existe uma terceira marcha no carro).

O equipamento mais sofisticado a nível de sensoramento automotivo é um tipo de radar que mapeia o caminho à frente do veículo fornecendo informações sobre obstáculos, buracos, oscilações, antes que cheguem ao veículo, fornecendo a possibilidade de se preparar os componentes da suspensão para uma situação antes que ela ocorra.

Todos esses sensores permitiriam um controle bem mais apurado do comportamento do carro, levando a um nível bem mais elevado de sofisticação no controle da suspensão. Os ganhos, porém, em relação ao preço pago seriam muito pequenos, já que com os sensores mais simples relacionados anteriormente obtém-se uma resposta em níveis muito satisfatórios. Além disso, um número maior de sensores implica numa maior manutenção e numa maior possibilidade de problemas.

Um problema a ser considerado é a confiabilidade dos sensores a desacelerações bruscas, como pequenos acidentes de trânsito. É importante que eles continuem a funcionar corretamente mesmo após esse tipo de imprevisto. Isso evitaria que o carro passasse a ficar 'torto' após uma pequena batida num estacionamento que não afetou a suspensão, porque o sensor está 'mentindo' à central de controle. Isso é importante principalmente para os sensores de posição das rodas.

#### **A central de controle:**

A central de controle é o cérebro do sistema de suspensão, controla todo o funcionamento da suspensão. Ela deve estar preparada para gerenciar todos os sensores, detectando possíveis entradas incoerentes, e



determinando com a maior precisão possível qual o estado atual do veículo e qual o provável comportamento do carro no instante seguinte. De posse dessas informações, ela deve decidir qual o comportamento ótimo de cada um dos elementos da suspensão (mola e amortecedor) em cada uma das rodas a partir das especificações de comportamento do veículo determinadas pelo fabricante. Essas informações devem então ser enviadas aos atuadores para que sejam efetivados.

As principais características da unidade de controle devem ser :

- **velocidade:** é muito importante que a análise dos sensores e a determinação das saídas seja realizada no menor tempo possível, possibilitando um tempo de resposta suficientemente baixo para garantir eficiência na ação da suspensão. Quanto menor for esse tempo de resposta, mais lento poderá ser o sistema de atuadores.
- **precisão:** a resposta gerada pela unidade de processamento deve ser correta, e refletir corretamente o comportamento esperado para o veículo.
- **tratamento de erros:** é muito importante que a central de controle saiba administrar os erros gerados pelos demais sistemas, para evitar que um sinal defeituoso de um sensor provoque um controle errado nos amortecedores, colocando o veículo em perigo.
- **flexibilidade:** o sistema deve estar preparado para receber novas implementações de comportamentos e/ou inclusão de novos sensores sem que isso provoque mudanças muito radicais, para minimizar custos com novas versões.
- **implementação:** o sistema deve ser viável, utilizando-se de componentes encontráveis no mercado e de uso acessível.
- **confiabilidade:** a unidade de controle é um dos elementos vitais do sistema de suspensão controlada. Deve-se minimizar as possibilidades de problemas e elaborar mecanismos que atuem em casos imprevistos.



- **interface:** deve-se prever a interface da unidade de controle com outros sistemas eletrônicos do veículo, como por exemplo o ABS sistema de ignição/injeção

Para a implementação da unidade de processamento, há duas filosofias básicas: um circuito lógico-combinatório ou um microcomputador dedicado.

### **Circuito Lógico/combinatório**

Um circuito lógico-combinatório é uma forma de implementar um função através de um conjunto de portas lógicas (portas 'NOT', 'AND', 'OR' e 'XOR'). Para se realizar isso, primeiramente monta-se a tabela-verdade do sistema, relacionando-se todas as combinações possíveis de entrada (normalmente  $2^x$ , onde 'x' é o número de entradas) e associando-se a cada uma delas um valor de saída. A partir dessas relações, utilizando-se algum método de codificação, (por exemplo através de Mapas de Carnot) estabelece-se um conjunto de portas lógicas que executam a função. Essas portas lógicas são então montadas numa placa de circuito impresso e consegue-se assim o circuito lógico-combinatório.

Para o controle da suspensão, o circuito lógico serve para selecionar um valor que será o ponteiro do valor de controle para a mola e amortecedor. Esse ponteiro é um endereço de memória no chip que contém todos os valores de controle. Esse chip de memória é um mapa dos estados possíveis para cada uma das rodas, sendo a peça a ser substituída entre diversos modelos de veículos. Além das portas lógicas, pode-se utilizar algumas operações na construção do valor, como somas, subtrações e deslocamentos (multiplicações e divisões por dois).

Um exemplo de codificação para ponteiro seria a concatenação pura e simples dos sinais dos sensores, colocando-se um junto do outro os números (binários) recebidos. Isso montaria um número único que por sua vez seria uma posição única no mapa da memória. Assim não se daria pesos às diversas entradas, nem seria necessária o circuito combinatório.

O circuito lógico-combinatório apresenta entretanto algumas desvantagens. A primeira delas é a falta de flexibilidade no seu projeto. Como a função gerada a partir da tabela verdade é muito particular (principalmente quando otimizada) é normalmente difícil mudar o projeto do controlador, principalmente incluir um novo sensor ou mudar a influência de algum dos sensores na montagem do ponteiro.

Por ser apenas uma combinação dos resultados dos sensores, fica difícil implementar rotinas que ponderem os erros entre a posição pretendida e a real, anteriores e acentuem ou atenuem as correções. Esse controle em malha-fechada é fundamental no gerenciamento da suspensão mas tem uma implementação muito complicada num circuito combinatório.

Outra grande dificuldade é o projeto da parte física do circuito. Como é um circuito específico para cada implementação, é necessário todo o projeto do circuito (cuidados com campos magnéticos, dissipação do calor, corrosão das quinas das trilhas) para cada implementação, o que torna o produto muito susceptível a problemas.

A inclusão de vários sensores, e o aumento de resolução deles pode provocar um aumento exagerado no tamanho da memória de mapeamento. Por exemplo, dois sensores com resolução de 8 bits necessitariam de 64 Kb de memória para armazenarem os estados de cada roda (256 Kb no total) apenas para eles dois. Isso pode ser simplificado pela combinação dos valores de

entrada para composição do valor do ponteiro, mas mesmo assim são valores elevados.

### **Microcomputador**

O controle por microcomputador dedicado procura aproveitar algum processador já existente e implementar um software que execute todo o gerenciamento de leitura dos sensores e geração do valor de estados.

Neste tipo de implementação o software apresenta importância fundamental, já que é ele quem determinará o comportamento do carro. Mas diferentemente do circuito lógico, no computador pode-se estabelecer relações matemáticas entre as diversas entradas para determinar o estado de saída, sem necessidade de mapear cada um dos estados individualmente. Pode-se também acentuar (ou atenuar) o sinal de controle em função dos erros anteriores acumulados, já que para guardar valores basta criar mais uma variável no programa.

Novos sensores são facilmente incorporados bastando apenas alterar a fórmula de cálculo do estado. O controle de erros é muito facilitado, pois pode-se implementar rotinas de auto teste e arquivos de registro de erros que serão lidos em concessionárias para determinação dos problemas. Isso é particularmente importante quando os erros são sazonais (aparecem e desaparecem espontaneamente), pois mesmo que o carro não esteja apresentando o problema, é possível identificá-lo.

Novos parâmetros de controle são facilmente implementados, como por exemplo alterar a resposta da suspensão devido a pequenas irregularidades no solo, o que é facilmente determinado calculando-se o desvio padrão da posição das rodas. Ou controlar o erro devido a carga do veículo,

calculando-se o erro de posição sempre que o veículo parar, e lembrando dos erros anteriores.

Com um microcomputador já existente, não acontecem os problemas normais de desenvolvimento de um produto novo, pois o hardware já é conhecido e aprovado (condição para ser escolhido). Deve-se atentar apenas se ele é capaz de aguentar as condições de utilização (vibração, calor, etc.).

O software não pode ser colocado na memória RAM do computador, pois ela se apagaria toda vez que o carro fosse desligado e teria que ser carregada toda vez que fosse ligado. Para evitar isso, ele é então gravado em um chip do tipo EPROM que substitui o chip de memória RAM original, deve-se manter ainda um pequeno espaço de memória volátil ainda disponível para utilização da pilha e de variáveis. A memória EPROM pode ser montada em cartuchos e ser facilmente trocada, permitindo que o próprio motorista escolha o comportamento de seu carro.

O principal problema da implementação por microcomputador é algo semelhante ao da implementação por circuito lógico, já que a interface do computador com os sensores e depois com a suspensão é feita por uma placa de interface que deve ser projetada como um circuito lógico. Mas é um projeto bem menor e mais simples que o do circuito de controle completo.

A partir das considerações acima pode-se perceber a grande vantagem de optar por um microcomputador para o controle da suspensão. Esse computador não necessita necessariamente ser um topo de linha no mercado, podendo ser inclusive computadores antigos e já fora de produção, como por exemplo, os baseados no microprocessador Z80: o MSX (Gradiente e Sharp) ou o TK90 (Microdigital), que tem um preço extremamente baixo.



No final do capítulo encontra-se o algoritmo básico do software de controle.

Os sinais de controle gerados pela central contém um código que representa qual a posição em que a mola e o amortecedor devem se posicionar. Esse valor varia de 0 a 7 (3 bites) para cada componente e indica a posição absoluta. A conversão desse índice para o valor real depende das características físicas dos controles da mola e do amortecedor, e é controlada por um conjunto de válvulas.

#### **Sistema de integração eletrônica/mecânica:**

Após o processamento dos sinais de entrada, obtém-se um conjunto de valores indicando os estados de  $k$  (rigidez da mola) e  $c$  (constante de amortecimento). É necessário então levar esses valores para os conjuntos mola/amortecedores e fazer com que eles respondam a esses sinais acionando válvulas eletromecânicas. Essa passagem de valores para as suspensões é realizada pelo sistema de integração eletrônica/mecânica. Em cada roda encontra-se um pequeno circuito eletrônico que trata esses dados, esse circuito será chamado de conversor.

A característica mais importante desse conversor deve ser a confiabilidade. Ele deve ser projetado para contornar possíveis falhas durante a operação e informar isso à central de processamento. Em caso de problemas, deve-se levar o amortecedor e a mola a uma posição padrão que apresente uma elevada segurança ao veículo.

O sinal de controle contém além das informações sobre as molas e amortecedores, parâmetros de erro ao conversor. No total, esse sinal tem 1 bite



de tamanho (8 bits) mais um sinal de envio, precisando assim de nove fios entre a central e as rodas sendo que cada bit codificado como a seguir:

- bit 8 - envio, indica que o sinal está disponível nos bits de 0 a 7.
- bit 7 - paridade ímpar do sinal, será setado quando houver um número ímpar de bits setados nos bits de 0 a 6.
- bit 6 - erro na unidade central do processamento. Só deve ser relevado se o bit de paridade estiver correto.
- bits 5,4,3 - Indicam a posição absoluta da regulação do amortecedor, sendo que um valor de 7 indica o amortecimento máximo e um valor 0 o amortecimento mínimo.
- bits 2,1,0 - Indicam a posição absoluta da regulação da mola, sendo que um valor de 7 indica a rigidez máxima e um valor 0 a rigidez mínima.

Há dois problemas principais entre a saída do sinal eletrônico do microprocessador até a chegada desses sinais nos elementos de controle: a confiabilidade dos dados (problemas de interferência podem adulterá-los); e a potência do sinal.

Para evitar os problemas de interferência, o modo mais simples é manter a fiação de controle o mais afastada possível dos geradores de campo magnético (bobina, ignição eletrônica, alto-falantes, etc.) e passá-las em 'conduíte' (conhecido como 'espaguete') próprio. Além dessa precaução, coloca-se um bit de paridade no sinal, de forma que caso o sinal chegue adulterado, possa ser detectado e não seja então passado à suspensão.

Os sinais de controle são enviados em seqüência para as centrais das rodas, e daí passadas para os elementos da suspensão. Caso algum erro seja detectado, o procedimento a seguir deve ser adotado:

- **erro de paridade:** mais três sinais de controle são recebidos e caso todos eles estejam errados o conjunto mola/amortecedor deve passar a uma posição padrão.
- **erro da central:** caso o sinal de paridade esteja correto, o conjunto mola/amortecedor deve passar a uma posição padrão. ?

A potência do sinal é outro fator crítico para o conversor. Ele recebe um sinal eletrônico do microprocessador que tem voltagem entre 0 e 5 Volts mas com amperagem muito baixa, insuficiente para acionar uma válvula solenóide. Para aumentar essa potência, é necessária a instalação de 'relés' que recebem um sinal de controle, uma alimentação própria e fornecem um sinal de saída de mesmo sinal do de entrada (0 ou 5 Volts) mas com capacidade de amperagem muito maior, podendo então acionar a válvula. As especificações do relé devem envolver a potência admissível e também o tempo de resposta, para evitar que o sistema tenha a resposta muito retardada. No projeto do conversor não é necessário se preocupar com a presença do relé inicialmente, pois ele é colocado como um 'driver' entre o conversor e a roda. Depois de se montar o conversor e de se escolher os relés, deve-se verificar apenas se os tempos entre eles são compatíveis.

Outras características a serem levadas em conta no projeto do conversor dizem respeito à resistência mecânica do circuito, pois estará numa posição muito sujeita a vibrações, principalmente em seus conectores e plugs, que não devem se soltar durante a operação. Caso isso aconteça é importante que a mola e o amortecedor se posicionem na situação padrão, para não comprometer o comportamento do carro. Nos plugs e conectores é interessante que haja um fio de sinal que indique que as conexões estão presas. Assim caso elas se soltem, o sinal cessará e a central pode ficar ciente disso. Nesse instante o sinal luminoso na tecla de teste se acende em vermelho.

O conversor está capacitado a gerenciar até 8 estados distintos de amortecedor e 8 de mola, entretanto nem sempre o sistema mecânico estará capacitado para receber esses sinais. Caso não sejam necessários todos os sinais, deve-se unir os fios que indicam estados diferentes nas posições iguais da mola ou do amortecedor, entre o conversor e os relês para economizar nos relês.

No final do capítulo apresenta-se um esquema do circuito do conversor para mola com 4 posições e amortecedor com 3 regulagens.

#### **Faixas dos sensores:**

Os sensores a serem colocados no veículo devem atender a determinadas especificações que têm por finalidade adaptá-los ao serviço para o qual foram designados. Desta forma as faixas de resolução desejadas para os sensores são:

##### **velocidade:**

O sensor de velocidade será um medidor de frequência magnético que tem por saída 1 bite (0 a 255) que poderá ser adaptado a qualquer mecanismo do veículo que apresente rotação proporcional à velocidade. A saída já apresenta a própria velocidade do carro em km/h.

##### **freagem:**

há duas indicações sobre o funcionamento do sistema de freios, uma indicação de que se está acionando o freio (em qualquer intensidade) retirada a partir do interruptor da luz de freio; e uma indicação de freagem de emergência, retirada de um sensor de pressão colocado no circuito hidráulico, do tipo liga-desliga. Desse modo a resposta é dada por dois bites, o bit 0 indica freagem e o bit 1 freagem de emergência.

##### **posição do volante:**

a posição do volante é definida por um inteiro na faixa de -128 a 127 (um bite) fornecido por um <sup>//</sup>encoder absoluto colocado na coluna de direção. Como o encoder só tem capacidade para medir uma volta é necessário um pequeno redutor entre a coluna e o encoder. O valor nulo indica que as rodas estão retas e um valor positivo indica rotação no sentido anti-horário. Por exemplo, com uma redução de 3,6:1 a resolução do sensor é de aproximadamente 10° do volante.

**posição do acelerador:**

um encoder ótico angular absoluto no pedal do acelerador, ou um transdutor de posição no cabo do acelerador no motor fornece um valor representativo da posição do acelerador com cinco bites (de 0 a 15), onde 0 representa o pedal solto e 15 o pedal totalmente pressionado.

**posição das rodas:**

*vertical*

um transdutor de posição absoluto fornece a posição relativa da roda em relação à carroceria como um inteiro de 5 bites (de -16 a 15) em centímetros. O valor nulo representa a posição da roda com o carro em ordem de marcha. parado e em uma superfície plana (aferido na fábrica ou em oficina autorizada). Os demais valores indicam posições relativas em relação a essa, onde os valores positivos indicam que a roda está mais alta que a posição referencial (mais próxima da carroceria).

Esses sensores devem estar fixados firmemente para não apresentarem trepidações, imunes a sujeira e outras ações que possam prejudicar a medida.

**Auto-teste:**



O sistema de controle da suspensão deve estar o mais protegido possível contra falhas e problemas durante a operação. Um dos procedimentos a esse respeito é a posição padrão de segurança nos conjuntos mola/amortecedor quando algum erro é detectado.

Alguns outros procedimentos podem, e devem ser adotados para maximizar essa segurança. Um desses procedimentos é uma rotina de auto-teste do software da unidade de controle. Esse auto-teste consiste basicamente de calcular um dígito de auto-controle da memória e compará-lo com o valor padrão desse teste. Se esses valores não coincidirem há algum erro na memória do microprocessador.

O valor desse código de validação é feito por uma fórmula do tipo:

$$D_{ac} = \Sigma (MEM_k \cdot COEF_k) \bmod 11$$

onde:

- $MEM_k$  : valor na posição de memória k;
- $COEF_k$  : coeficiente do valor, são os valores: 3,5,7,9,13,15,17,19,3,5,7,9,13,15,17, etc.

$\bmod 11$  : o resto da divisão por onze (se for dez devolve zero).

A chance desse código permanecer inalterado caso uma posição de memória seja modificada é praticamente impossível, principalmente se for calculada várias vezes com coeficientes diferentes. Assim pode-se verificar com razoável precisão a integridade do sistema de processamento.

Além disso a cada 255 leituras dos sensores, realiza-se a 'leitura' de uma entrada simulada armazenada na memória e verifica-se se os valores de

*redun-  
dância*

?



saída são corretos (comparados com valores pré-determinados). Caso se constate um erro, passa-se o processador para o estado erro.

O teste das partes móveis e sensores já é mais difícil, pois não se consegue testar o funcionamento de um sensor a menos que se aplique nele a grandeza que ele mede, e isso é muito difícil, por exemplo, no sensor de velocidade. Assim alguns desses sensores só poderão ser testados indiretamente.

Os testes indiretos são feitos comparando-se os valores lidos pelos sensores, e tentando perceber alguma incoerência nesses valores, assim mudanças muito bruscas nesses valores, ou valores próximos dos valores limites são taxados como 'suspeitos'.

Um teste dos atuadores é feito sempre quando da partida do veículo. Nesse teste a constante da mola é variada de seu valor mínimo ao máximo, isso implica em uma movimentação da carroceria do carro, de sua posição mais baixa à posição mais alta, medindo-se essa posição pelos transdutores. Assim pode-se verificar algum problema nos atuadores ou nos sensores de posição. Deve-se estar preparado para o caso do carro estar carregado, o que provocaria uma pequena diminuição da altura da suspensão traseira. Isso pode ser contornado verificando se as rodas mantêm alturas equivalentes. Esse teste deve ser imediatamente desligado caso o carro se mova, passando para o modo normal de controle, evitando que o carro ande ~~se~~ enquanto a os atuadores estão sendo testados.

Quando algum erro for detectado o seu código é colocado em uma memória com alimentação própria que armazenará os últimos 255 códigos de erro, funcionando como uma 'caixa-preta' do histórico da suspensão. Essas informações são recuperadas pelas oficinas por meio de equipamentos de diagnóstico, como descrito no tópico 'Sistemas de suporte'.

## Sistemas de suporte:

Além dos sistemas diretamente ligados com o controle da suspensão (os sensores, os conversores, etc.) há um outro conjunto de sistemas que têm por finalidade suportar o funcionamento do controle. Esses sistemas podem ser internos (quando estão dentro do próprio veículo) ou externos (quando estão instalados em oficinas).

Como sistema interno, o mais destacado e importante é o sistema de fornecimento de energia, que tem por finalidade alimentar os sensores e a unidade central de processamento. Os microprocessadores funcionam com tensão de 5 Volts, enquanto a bateria fornece 12 Volts (com uma tendência de passar a 24 Volts no futuro). Para fazer essa mudança de voltagem é preciso um transformador de corrente contínua com saída estabilizada, para evitar as oscilações na tensão de entrada, o que poderia interferir no comportamento da central de controle.

É necessário também um fornecimento de uma fonte auxiliar para a memória de erros, que deve continuar sendo mantida mesmo com a bateria desligada. Essa fonte pode ser um conjunto de pilhas pequenas em um suporte de plástico acondicionadas perto da central. É importante que haja alguma indicação para o motorista quando essa bateria estiver fraca, para que seja substituída. Ela deve durar, no mínimo, o intervalo entre as manutenções normais.

Os sistemas externos de suporte são responsáveis principalmente pela aferição e diagnóstico do sistema de suspensão. Além do tradicional 'alinhador de direção', um conjunto de calibradores avaliam os diversos sensores, provocando aí sim uma entrada controlada e medindo a saída (o que não se consegue no auto teste no veículo).

Além da aferição dos sensores, uma revalidação da inicialização de fábrica pode ser executada medindo-se toda a posição do carro e realizando correções nos valores padrões. Isso pode ser feito substituindo-se o chip de inicialização por um novo chip gravado pela oficina.

Pode-se ler as informações de erro levantadas pelo microcomputador durante sua utilização para direcionar um reparo, ou mesmo para analisar problemas que surgiram e depois se solucionaram sozinhos. Após essa leitura, a memória que guarda as indicações de erro é reinicializada.

Uma das principais características dos sistemas de suporte externos, além obviamente da precisão, é uma grande robustez para suportar o uso em oficinas, onde a chance de quedas e batidas é muito grande. São equipamentos normalmente produzidos com corpo de plástico injetado inquebrável e formato otimizado para a função e para a posição em que será instalado no carro ou na bancada, de modo a minimizar o tempo de preparo da aferição. É muito importante prever a aferição desses calibradores, pois eles também podem sofrer desregulagens.

## SIMULAÇÕES

O sistema de equações diferenciais apresentado na fundamentação teórica são transformados em equações matriciais de estado.

O Estado de um sistema dinâmico é o menor conjunto de variáveis (denominado *variáveis de estado*) tal que o conhecimento do valor em  $(t = t_0)$ , em conjunto com o conhecimento do valor da entrada do sistema para  $(t \geq t_0)$ , determina completamente o comportamento do sistema para qualquer instante  $(t \geq t_0)$ .

### MATRIZ DE ESTADOS

Um sistema linear invariante no tempo pode ser descrito através da seguinte equação de estado e equação de saída:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t)$$

onde as dimensões dos vetores e matrizes são:

$\mathbf{x}(t)$	$n$	(vetor de estados)
$\mathbf{y}(t)$	$m$	(vetor de saída)
$\mathbf{u}(t)$	$r$	(vetor de entrada)
$\mathbf{A}$	$n \times n$	(matriz de estados)
$\mathbf{B}$	$n \times r$	(matriz de entrada)
$\mathbf{C}$	$m \times n$	(matriz de saída)
$\mathbf{D}$	$m \times r$	(matriz de transmissão direta)

A matriz D designa a transmissão direta do sistema e muitas vezes não existe, ou o seu efeito pode ser considerado à parte.

Na transformação das equações do movimento em equações de estado, é necessário atingir a segunda derivada das variáveis de estado, que no caso da suspensão são:

$$z, \theta, z_f \text{ e } z_r$$

Para atingir a segunda derivada utiliza-se também como variáveis de estado as velocidades  $\dot{z}$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\dot{z}_f$  e  $\dot{z}_r$ . Assim quando introduzidas no vetor de estado  $x$ , atinge-se a derivada desejada.

A formulação para o veículo fica:

$$\dot{x}(t) = \text{Mat\_A}x(t) + \text{Mat\_B} \cdot \text{Mat\_u}$$

$$y(t) = \text{Mat\_C}x(t) + \text{Mat\_D} \cdot \text{Mat\_u}$$

Chamando:

Coefficientes da matriz Mat\_A:

$$A_2 = -(k_f + k_r)/M;$$

$$B_2 = -(c_f + c_r)/M;$$

$$C_2 = -(a_1 \cdot k_f - b_1 \cdot k_r)/M;$$

$$D_2 = -(a_1 \cdot c_f - b_1 \cdot c_r)/M;$$

$$E_2 = k_f/M;$$

$$F_2 = c_f/M;$$

$$G_2 = k_r/M;$$

$$H_2 = c_r/M;$$



$$A_4 = -(a_1 \cdot k_f \cdot b_1 \cdot k_r) / J; \text{ OK}$$

$$B_4 = -(a_1 \cdot c_f \cdot b_1 \cdot c_r) / J; \text{ OK}$$

$$C_4 = -(a_1^2 \cdot k_f + b_1^2 \cdot k_r) / J; \text{ OK}$$

$$D_4 = -(a_1^2 \cdot c_f + b_1^2 \cdot c_r) / J; \text{ OK}$$

$$E_4 = a_1 \cdot k_f / J; \text{ OK}$$

$$F_4 = a_1 \cdot c_f / J; \text{ OK}$$

$$G_4 = -b_1 \cdot k_r / J; \text{ OK}$$

$$H_4 = -b_1 \cdot c_r / J; \text{ OK}$$

$$A_6 = k_f / m_f; \text{ OK}$$

$$B_6 = c_f / m_f;$$

$$C_6 = a_1 \cdot k_f / m_f; \text{ OK}$$

$$D_6 = a_1 \cdot c_f / m_f;$$

$$E_6 = -(k_f + k_t) / m_f; \text{ OK}$$

$$F_6 = -(c_f + c_t) / m_f;$$

$$G_6 = 0;$$

$$H_6 = 0;$$

$$A_8 = k_r / m_r; \text{ OK}$$

$$B_8 = c_r / m_r;$$

$$C_8 = -b_1 \cdot k_r / m_r;$$

$$D_8 = -b_1 \cdot c_r / m_r; \text{ OK}$$

$$E_8 = 0;$$

$$F_8 = 0;$$

$$G_8 = -(k_f + k_t) / m_r; \text{ OK}$$

$$H_8 = -(c_f + c_t) / m_r;$$

Coefficientes da matriz  $\text{Mat}_u$ :

$$E_A = k_t / m_f;$$

$$E_B = c_t / m_f;$$

$$E_C = k_t / m_r;$$

$$E_D = c_t / m_r;$$

Fazendo então o vetor de estados:

$$x = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ 0 \\ 0 \\ z_f \\ \dot{z}_f \\ z_r \\ \dot{z}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix}$$

Das equações do movimento tem-se:

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

$$\dot{x}_2 = A_2 \cdot x_1 + B_2 \cdot x_2 + C_2 \cdot x_3 + D_2 \cdot x_4 + E_2 \cdot x_5 + F_2 \cdot x_6 + G_2 \cdot x_7 + H_2 \cdot x_8$$

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

$$\dot{x}_4 = A_4 \cdot x_1 + B_4 \cdot x_2 + C_4 \cdot x_3 + D_4 \cdot x_4 + E_4 \cdot x_5 + F_4 \cdot x_6 + G_4 \cdot x_7 + H_4 \cdot x_8$$

$$\dot{x}_5 = x_6$$

$$\dot{x}_6 = A_6 \cdot x_1 + B_6 \cdot x_2 + C_6 \cdot x_3 + D_6 \cdot x_4 + E_6 \cdot x_5 + F_6 \cdot x_6 + G_6 \cdot x_7 + H_6 \cdot x_8$$

$$\dot{x}_7 = x_8$$

$$\dot{x}_8 = A_8 \cdot x_1 + B_8 \cdot x_2 + C_8 \cdot x_3 + D_8 \cdot x_4 + E_8 \cdot x_5 + F_8 \cdot x_6 + G_8 \cdot x_7 + H_8 \cdot x_8$$

As matrizes ficam:

Matriz de estados:

$$\text{Mat\_A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 & E_2 & F_2 & G_2 & H_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 & E_4 & F_4 & G_4 & H_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_6 & B_6 & C_6 & D_6 & E_6 & F_6 & G_6 & H_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ A_8 & B_8 & C_8 & D_8 & E_8 & F_8 & G_8 & H_8 \end{bmatrix}$$

Matriz de entrada:

$$\text{Mat\_B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_A & E_B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_C & E_D \end{bmatrix}$$

Matriz de saída:

$\text{Mat\_C} = I(8)$ , onde  $I(8)$  é uma matriz identidade  $8 \times 8$ ;

Matriz de transmissão direta:

$$\text{Mat\_D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## ENTRADAS

Devido ao fato de o sistema possuir duas entradas nas equações de salto das massas não suspensas, é necessário construir uma matriz que multiplicada pela matriz de entrada, expresse corretamente o sistema total de

equações. O algoritmo da rotina que simulou o movimento do veículo, ao discretizar as equações de estado, utilizou matrizes transpostas de  $Mat\_C$  e  $Mat\_D$ , sendo portanto necessária uma adaptação da matriz de entrada, não compatibilizando esta com uma operação manual de matrizes.

Esta matriz com as entradas será, portanto, do tipo:

$Mat\_u = [u1 \ u2 \ u3 \ u4]$ , com tantas linhas quantas forem as discretizações do intervalo de tempo adotado, ou seja, em cada linha haverá o valor de entrada para o respectivo tempo discreto.

Utilizando o software MatLab a suspensão do veículo foi simulada para os coeficientes de mola e amortecimento de um carro real. Os dados utilizados foram:

#### Parâmetros geométricos do veículo

$$a = 1.0584 \text{ m}$$

$$b = 1.3416 \text{ m}$$

$$r = 1.15 \text{ m}$$

$$L = 2.4 \text{ m}$$

Onde:

$a, b$ : posição das rodas dianteira e traseira em relação ao C.G.;

$r$ : raio de giração do veículo no plano de simetria;

$L$ : distância entre-eixos

#### Constantes da suspensão

$$c_f = 980 \text{ N}\cdot\text{s/m}$$

$$c_r = 920 \text{ N}\cdot\text{s/m}$$



$$k_f = 14000 \text{ N/m}$$

$$k_r = 16000 \text{ N/m}$$

$$c_t = 10 \text{ N}\cdot\text{s/m}$$

$$k_t = 160000 \text{ N/m}$$

(Nomenclatura usada no modelamento do veículo)

No modelo (suspensões em paralelo), temos:

$$c_f = 980/2 \text{ N}\cdot\text{s/m}$$

$$c_r = 920/2 \text{ N}\cdot\text{s/m}$$

$$k_f = 2 \cdot 14000 \text{ N/m}$$

$$k_r = 2 \cdot 16000 \text{ N/m}$$

$$c_t = 10/2 \text{ N}\cdot\text{s/m}$$

$$k_t = 2 \cdot 160000 \text{ N/m}$$

**Massas do veículo:**

$$M = 900 \text{ kg}$$

$$m_f = 2 \cdot 36 \text{ kg}$$

$$m_r = 2 \cdot 32 \text{ kg}$$

onde  $m_f$  e  $m_r$  são duplicadas pois o modelo é plano.

(Nomenclatura usada no modelamento do veículo)

**Entradas:**

As entradas escolhidas para as simulações foram degrau e senoidal, podendo-se avaliar as respostas do veículo em frequência e o amortecimento.

Para a entrada em degrau, adotou-se a velocidade do veículo igual a 10 m/s e tamanho do degrau de 0.15 m. Construiu-se então uma matriz para as funções de entrada, levando-se em conta o tempo de atraso entre as rodas dianteiras e traseiras:

$$-vel = 10 \text{ m/s},$$

$$-Amp = 0.15 \text{ m},$$

$$-ta = L/vel \text{ (tempo de atraso, em segundos)}$$

A primeira linha da matriz fica (degrau nas rodas dianteiras):

$$u1 = Amp;$$

$$u2 = 0;$$

$$u3 = 0;$$

$$u4 = 0;$$

$$Mat\_u(1,:) = [u1 \ u2 \ u3 \ u4];$$

Esta entrada permanece até o degrau chegar às rodas traseiras. Utilizando um intervalo entre discretizações de 0.05 s, o degrau chegará às rodas traseiras na 5ª iteração, permanecendo assim até o final do período de análise.

As linhas  $j$  da matriz da iteração 5 até a iteração 151 (intervalo de 0 a 7.5 segundos) serão do tipo:

$$\text{Mat}_u(j) = [\text{Amp } 0 \text{ Amp } 0];$$

Para a entrada senoidal foram realizadas duas simulações, buscando a ressonância na massa suspensa, e depois na não suspensa.

Sabendo que a frequência natural da massa suspensa é:

Salto:

$$\omega_{ns} = \sqrt{\frac{k_f + k_r}{M}} = 8,14 \text{ rad/s} = 1,30 \text{ Hz}$$

Mergulho:

$$\omega_{np} = \sqrt{\frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{J}} = 8,64 \text{ rad/s} = 1,38 \text{ Hz}$$

e que as frequências naturais das massas suspensas são:

Salto da massa não-suspensa dianteira

$$\omega_{nfr} = \sqrt{\frac{k_f + k_r}{m_f}} = 69,52 \text{ rad/s} = 11,06 \text{ Hz}$$

Salto da massa não-suspensa traseira

$$\omega_{nhr} = \sqrt{\frac{k_f + k_r}{m_r}} = 74,16 \text{ rad/s} = 11,80 \text{ Hz}$$

simulou-se o sistema em frequências de 1.3 Hz e em 11.5 Hz.

Para tal, utilizou-se uma velocidade do veículo de 10 m/s, com distância entre picos de 7.7 m, obtendo-se uma frequência de 1.3 Hz, e com distância entre picos de 0.87 m, obtendo-se uma frequência de 11.5 Hz. Manteve-se a amplitude em 0.15 m.

Definindo-se então as funções de entrada como:

$$u1 = \text{Amp} \cdot \sin(\omega \cdot t);$$

$$u2 = \text{Amp} \cdot w \cdot \cos(\omega \cdot t);$$

$$u3 = \text{Amp} \cdot \sin(\omega \cdot (t - t_a));$$

$$u4 = \text{Amp} \cdot w \cdot \cos(\omega \cdot (t - t_a));$$

onde  $w = 2\pi \cdot \text{frequência}$ ,

$t_a$  é o tempo de atraso.

Cada linha  $j$  da matriz  $\text{Mat}_u$  fica:

$$\text{Mat}_u(j) = [u1 \ u2 \ u3 \ u4],$$

onde  $t$  é definido como:

$t = 0.0125 \cdot j$ , (intervalo entre discretizações de 0.0125 segundos, para um período total de simulação de 7.5 segundos -  $j$  varia de 0 a 601)

Os parâmetros geométricos e massas são de um veículo Escort (referência [2]) e as constantes da suspensão da referência [3]. O raio de giração foi tomado como aproximadamente a raiz quadrada do produto  $a \cdot b$ , conforme hipótese citada no capítulo 'CONFORTO'.

Foram realizadas as simulações, a fim de se avaliar se o programa se comportava de forma satisfatória. Notar que as constantes da

suspensão não são do veículo acima citado, porém são de um veículo médio (1000 kg). Para a obtenção de valores de projeto de amortecimento, serão feitas simulações em piso padrão, para que, de acordo com os padrões de conforto descritos do capítulo 'CONFORTO', possa se realizar a análise de sensibilidade.

A modificação a ser feita na simulação para implementar o amortecimento controlado será somente a substituição dos valores  $c_f$  e  $c_r$  por diversos valores, selecionando os de melhor resposta.

Os resultados gráfico do comportamento do veículo podem ser observados nos gráficos anexos no final do capítulo.

Pode-se observar que para a simulação em 1.3 Hz, a massa suspensa entrou em ressonância (amplitude de  $z$  foi a 0.8 m). As variáveis  $z_f$  e  $z_r$  se comportaram da maneira esperada (apesar de estar em uma frequência muito menor de que sua frequência natural,  $z_r$  ampliou-se e não acompanhou a superfície com oscilações de 0.15 m de amplitude, cresceu para 0.20 m, influenciada pela massa suspensa, enquanto  $z_f$  manteve-se com amplitude abaixo de 0.15).

Na simulação em frequência de 11.5 Hz, observa-se que a massa suspensa realmente é pouco influenciada pela ressonância que ocorreu nas massas não suspensas (amplitudes de 1 m). A amplitude de  $z$  é muito baixa (da ordem de 6 milímetros quando se entra em um regime constante, e o valor do ângulo  $\theta$  também é baixíssimo).

Na resposta a degrau, o sistema se comportou como o esperado, com a resposta da massa suspensa amortecida, porém com amplitudes que não estariam dentro do padrão de conforto.



Cabe ao projeto estabelecer o valor numérico para o amortecimento e rigidez das molas, de modo a se obter as melhores respostas possíveis.

## MODELO

### INTRODUÇÃO

Após a exaustiva elaboração do modelo matemático um modelo experimental foi requerido. Sua construção tem por finalidade a comprovação dos conceitos abstraídos.

É importante lembrar que o modelo não reproduz fielmente as condições de trabalho do componente real. Algumas características da aplicação real foram desprezadas. Isto se faz necessário para permitir que um modelo seja construído de modo a se verificar de modo intensivo o conceito em questão.

É importante ressaltar a diferença entre dois conceitos distintos muitas vezes confundidos: protótipo e modelo.

Modelo é o componente construído para comprovar na prática um conceito inovador.

Protótipo é o passo que precede a produção, ou seja, é idêntico ao componente final com a única diferença de não ser construído com ferramentas e material normal de produção.

No caso deste projeto é bastante claro que não seria possível a elaboração de um protótipo. O modelo escolhido está detalhado a seguir, considerando as devidas simplificações de modo a permitir a construção do modelo mais elementar e de fácil execução possível sem comprometer a comprovação do conceito da suspensão ativa.

### MODELO TEÓRICO IDEAL:

O modelo teórico ideal para a suspensão consiste de três partes:

- Hardware Mecânico;
- Hardware Eletrônico;
- Software de Controle.

### Hardware Mecânico

O esquema mecânico da suspensão é formado basicamente de atuadores pneumáticos controlados por válvulas reguladoras de pressão, atuando conjuntamente com uma molas helicoidais e amortecedores hidráulicos controlados por válvulas reguladoras de vazão. A pressão para o sistema pneumático é suprida por um compressor de ar de acionamento elétrico.

O atuador pneumático deve ter diâmetro interno tal que suporte a carga de uma porção do peso do carro originalmente suportada por aquele braço de suspensão mais a carga dinâmica tais como forças originárias de acelerações e desacelerações e também por acelerações laterais impressa pelo veículo à mesma (carga a ser controlada).

As válvulas reguladoras de pressão devem ser reguladas eletronicamente e ter resposta em frequência alta o suficiente para garantir uma resposta rápida ao sistema de atuação. Estas válvulas são similares às utilizadas em sistemas de freio ABS em caminhões - que também utilizam sistema pneumático.

As molas helicoidais possuem constante de rigidez menor do que as originalmente utilizadas no veículo já que uma parte da carga estará sendo suportada pelo atuador pneumático.

Os amortecedores hidráulicos têm suas constantes de amortecimento reguladas por válvulas reguladoras de vazão. Para isso o amortecedor a ser utilizado deve ter a passagem de óleo externa ao invés de interna.

As válvulas reguladoras de vazão são atuadas eletronicamente da mesma forma que as reguladoras de pressão.

O compressor de ar de acionamento elétrico deve fornecer ar suficiente para o consumo do sistema.

### **Hardware Eletrônico**

O sistema de eletrônico consiste de três grupos:

**Sensoreamento:** o sensoreamento é executado por vários elementos. Um encoder ótico faz a leitura da posição do volante de modo a verificar o raio da curva executada pelo veículo. Quatro transdutores lineares para informar sobre a irregularidade do piso e a distância do carro ao solo.

**Atuadores:** São os solenóides e relés para interface do sistema digital para o mecânico.

**Processador:** é o computador de bordo que irá executar o controle do sistema, recebendo o sinal dos sensores e devolvendo um sinal para a atuação. O computador de bordo deve atender requisitos básicos tal como resistir a vibração e temperatura agressivas.

### **Software de Controle**

O software de controle deverá atuar em três casos:

**Altura do veículo:** o programa atua na suspensão de modo a garantir que o veículo mantenha uma altura constante em relação ao solo, independente da carga. A referência para esta altura é dada pelos transdutores lineares em cada roda.

**Curvas:** a suspensão deve ser controlada de modo a evitar que o veículo tombe em curvas. O controle atua em avanço se utilizando dos dados

fornecidos pelo sensor de velocidade e do volante de direção. Através de um cálculo simples é determinada a aceleração centrípeta a que o veículo está sujeito, descobrindo quanto ele irá tombar.

**Aceleração/Frenagem:** Através dos dados fornecidos pelo sensor de velocidade o controle irá atuar de modo a evitar que o veículo mergulhe ou empine em casos de acelerações e frenagens bruscas.

**Irregularidades do piso:** o controle lê dos transdutores lineares uma média quadrática média das posições da roda em relação a carroceria, descobrindo assim o quanto o solo é irregular, atuando sobre o amortecedor.

**Velocidade:** da leitura do sensor de velocidade o controle avalia qual o estado de velocidade do veículo, deixando o amortecedor mais duro ou mais suave conforme a necessidade de segurança ou conforto.

De acordo com as simulações realizadas e através de informações obtidas das principais fábricas de amortecedores, as respostas da suspensão para entradas em frequência são mais facilmente alteradas através do controle do amortecedor. A esse fato soma-se a dificuldade de se distinguir as entradas do solo (irregularidades do solo), das entradas do veículo (frenagem, aceleração e curvas).

Esta dificuldade torna inconveniente o simples controle de posição da roda, a não ser que a entrada do solo já fosse conhecida, fato este só possível com um sensoramento do solo. O conhecimento do perfil do solo eliminaria a necessidade qualquer outro sensor, pois já seria conhecida antecipadamente a posição da roda e, neste caso, um cilindro hidráulico seria o atuador mais adequado.



Deste modo, o controle da suspensão foi dividido em duas partes principais:

- Controle devido às entradas do solo;
- Controle devido às entradas do veículo.

#### Controle devido às entradas do solo

A atuação se limitará à mudanças dos valores da restrição do amortecedor. De acordo com a velocidade e com a frequência e amplitude da variação de posicionamento da roda (dados estes obtidos através do transdutor linear) a restrição do amortecedor é variada. Para atingir esta variação uma válvula reguladora de vazão pode ser utilizada, com a grande vantagem da variação linear da restrição.

De maneira genérica, um amortecedor deve ser suave para absorver entradas em alta frequência, minimizando as vibrações na carroceria, e deve ser menos suave com entradas em baixa frequência, evitando uma "flutuação" da carroceria em uma frequência abaixo de 1 Hz, o que causaria enjoô e náuseas nos ocupantes do veículo, além de transmitir uma sensação de insegurança ao motorista.

A velocidade recebe um tratamento prioritário em relação às entradas do solo, devido ao aspecto segurança. Em outras palavras, o veículo em alta velocidade apresentará amortecedores "duros", mesmo quando trafegando em piso irregular. Amortecedores suaves podem prejudicar a estabilidade do veículo em uma situação de emergência.

O coeficiente de amortecimento será discretizado de acordo com faixas de velocidade do veículo, visto que para pequenas variações de velocidade a percepção dos ocupantes não seria suficiente para distinguir dois amortecimentos diferentes consecutivos, e facilitará a atuação sobre a reguladora

de vazão, devido ao fato do sistema possuir dois sistemas de controle rodando em paralelo. Com esta simplificação, a simples leitura de tempos em tempos do sensor de velocidade poderá suprir as necessidades.

Definindo, assim, as faixas de velocidades:

- Abaixo de 10 km/h;
- 10 a 30 km/h;
- 30 a 40 km/h;
- 40 a 50 km/h;
- 50 a 57,5 km/h;
- 57,5 a 65 km/h;
- 65 a 72,5 km/h;
- 72,5 a 80 km/h;
- Acima de 80 km/h.

A determinação numérica dos coeficientes são determinados a partir das simulações. As simulações foram feitas para as frequências de ressonância de carroceria (massa suspensa) e da massa não suspensa, e para 3 frequências (simulações para entradas em frequência). Os gráficos para cada simulação realizada se encontram no apêndice do final do projeto. Encontram-se os resultados com os parâmetros originais, seguidos dos resultados com as constantes otimizadas, para as frequências de 1, 3, 5, 8 e 10 Hz.

Através de uma análise sobre a simulação da suspensão as seguintes constantes 'ótimas' foram encontradas:

Para as entradas em frequência:

- 1 Hz:  $c_f = 19600 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 20000 \text{ N.s/m}$ ;
- 3 Hz:  $c_f = 3920 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 4000 \text{ N.s/m}$ ;
- 5 Hz:  $c_f = 1470 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 1500 \text{ N.s/m}$ ;
- 8 Hz:  $c_f = 980 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 1000 \text{ N.s/m}$ ;

- 10 Hz:  $c_f = 980 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 1000 \text{ N.s/m}$ ;

Para velocidade:

- Abaixo de 10 km/h:  $c_f = 19600 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 20000 \text{ N.s/m}$ ;
- 10 a 30 km/h: de acordo com a frequência de entrada;
- 30 a 40 km/h: de acordo com a frequência de entrada;
- 40 a 50 km/h: de acordo com a frequência de entrada;
- 50 a 57,5 km/h:  $c_f = 1470 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 1500 \text{ N.s/m}$ ;
- 57,5 a 65 km/h:  $c_f = 3920 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 4000 \text{ N.s/m}$ ;
- 65 a 72,5 km/h:  $c_f = 3920 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 4000 \text{ N.s/m}$ ;
- 72,5 a 80 km/h:  $c_f = 19600 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 20000 \text{ N.s/m}$ ;
- Acima de 80 km/h:  $c_f = 19600 \text{ N.s/m}$ ;  $c_r = 20000 \text{ N.s/m}$ ;

Observa-se que a frequência de entrada está intimamente ligada à velocidade do veículo e aos espaçamentos entre os picos e vales do terreno. Adota-se, então, que os coeficientes de amortecimento correspondentes às faixas de velocidade acima de 50 km/h terão prioridade sobre os coeficientes relativos às frequências de entrada, independente de qual seja a frequência atuante no momento. Este procedimento é adotado visando beneficiar a segurança nestas faixas de velocidades onde uma pior dirigibilidade e uma possível colisão teriam consequências muito sérias. A mesma linha de pensamento é adotada para as faixas abaixo das acima mencionadas, visando beneficiar o conforto, ou seja, abaixo de 50 km/h os coeficientes prioritários serão os avaliados através da entrada em frequência.

Convém notar que o coeficiente de amortecimento alto para a faixa de velocidade abaixo de 10 km/h foi adotado visando uma melhor manobrabilidade, conceito este adquirido através de visitas à fábrica nacional que se utiliza de recurso semelhante em uma linha de amortecedores.

Os dados do veículo estudado são os seguintes (foram feitas variações a partir desses valores):

$$\begin{aligned}c_f &= 980 / 2 \text{ (coeficiente de amortecimento dianteiro)} \\c_r &= 1000 / 2 \text{ (coeficiente de amortecimento traseiro)} \\k_f &= 2 * 28000 \text{ (rigidez das molas na suspensão dianteira)} \\k_r &= 2 * 32000 \text{ (rigidez das molas na suspensão traseira)} \\c_t &= 10 / 2 \text{ (coeficiente de amortecimento do pneu)} \\k_t &= 2 * 160000 \text{ (rigidez das molas na suspensão traseira)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M &= 1200 \text{ (massa suspensa)} \\m_f &= 2 * 36 \text{ (massa suspensa dianteira)} \\m_r &= 2 * 32 \text{ (massa suspensa traseira)}\end{aligned}$$

Esse método para a determinação das constantes de amortecimento foi realizado desta forma somente devido ao caráter acadêmico desta parte do projeto, pois estes coeficientes são sempre determinados empiricamente, com o sistema instalado em um veículo. Esta escolha se baseia em dados técnicos do veículo porém só é certificada após uma avaliação subjetiva.

A válvula reguladora de vazão controlada através de programa de computador pode ajudar muito o trabalho de calibragem da suspensão, visto que é necessário somente a alteração de parâmetros no programa, o que pode ser feito inclusive com o veículo em movimento. Isto só é possível graças a variação contínua da válvula.

#### Controle devido às entradas do veículo

As entradas do veículo são aquelas controladas pelo motorista. Elas podem ser de vários tipos:



- Mergulho devido a frenagem;
- Inclinação devido a aceleração;
- Rolamento devido a aceleração lateral (curvas).

### Mergulho

O controlador da suspensão verifica a redução na velocidade e inicia um teste para verificação da frenagem. Um sensor localizado no sistema de fluido de freio do veículo pode informar se o motorista está realizando uma frenagem ou o veículo está realizando uma redução de velocidade sem que o freio seja acionado - no caso do veículo subir uma ladeira, onde a velocidade cai porém o carro não está sendo frenado.

Com os dados referentes ao tipo de frenagem (brusca, suave, etc) é calculado qual a carga dinâmica aplicada pelo veículo em desaceleração sobre as molas dianteiras. Para compensar esta carga, uma pressão deve ser adicionada no pistão de controle de modo a evitar o mergulho do carro.

No caso de 'frenagens em estado de pânico' o coeficiente de amortecimento da suspensão dianteira também deve ser majorado de modo a garantir a integridade do carro, além de permitir uma maior dirigibilidade em casos de perigo.

### Inclinação na aceleração

O sistema de controle pode verificar que o carro está sendo acelerado através da variação positiva (acréscimo) de velocidade. Além desta informação há uma verificação a ser feita: a posição do pedal do motorista deve ser comparada com a rotação do motor de modo a determinar se o carro está em processo de aceleração ou não. Isto deve ser feito para evitar que a variação positiva da velocidade seja confundida com o efeito causado pela passagem do veículo por um declive.



A carga dinâmica referente a aceleração é calculada e uma pressão adicional é conferida aos pistões da suspensão traseira. Com isso a inclinação conferida ao veículo devido a aceleração será minimizada.

### **Rolamento**

O sensor localizado no eixo da direção do veículo informa qual o ângulo do volante e, associado com o valor da velocidade obtido do velocímetro informam qual o raio e por consequencia qual a aceleração lateral sofrida.

Calculada a carga lateral, os pistões do lado de fora da curva sofrerão um acrescimo de pressão enquanto que os de dentro sofrerão uma diminuição. Isto visa diminuir o efeito de rolamento imposto pela curva realizada pelo motorista.

Podemos perceber que o controle relativo às entradas do veículo se restringem basicamente ao controle do pistão que regula a suspensão. A modificação do coeficiente de amortecimento só é alterada em caso das situações de entrada do solo, especificadas anteriormente.

### **SIMPLIFICAÇÕES PARA CONSTRUÇÃO DO MODELO**

O equacionamento realizado para a suspensão deve ser simplificado de modo a permitir que um protótipo seja construído. Estas simplificações são necessárias uma vez que a construção do protótipo com as características desejadas e especificadas necessita de uma série de componentes mecânicos e hidráulicos de difícil obtenção.

O protótipo ideal deveria simular uma suspensão de automóvel. Isto poderia ser feito diretamente no carro ou em uma bancada. Para aquisição de dados sobre o comportamento do automóvel seria necessários diversos sensores: transdutores lineares, encoders absolutos, sensores de pressão e medidores de

velocidade. Além destes itens seria necessário também que uma outra série de componentes mecânicos e pneumáticos fosse utilizada. Devido a falta destes componentes na escola e a falta de incentivo e patrocínio do setor privado este protótipo ideal não poderá ser construído. Desta forma partiu-se então para a simplificação do projeto de modo a torná-lo executável.

### **SIMPLIFICAÇÕES:**

#### **Obtenção de dados do carro**

Ao invés da aquisição de dados através de elementos de interface mecânica digital, será utilizada uma aquisição de dados *via micro*, ou seja, os dados sobre o comportamento do automóvel serão criados por um programa. Com esta simplificação o protótipo não necessita mais de sensores e transdutores, além de placas de conversão analógico-digitais.

#### **Atuação**

Não haverá mais atuação sobre o amortecedor do automóvel uma vez que isto é de difícil realização. Em conversa com representantes de fábricas de amortecedores foi denotado o fato de que a modificação do coeficiente de amortecimento do amortecedor é muito complicada com os recursos que dispomos. O nosso protótipo atuará apenas sobre o balanço do automóvel quando este sofre acelerações, sejam elas devido a movimentação do carro em curvas ou mesmo no movimento retilíneo - quando este executa frenagens ou acelerações bruscas.

#### **Forma como o carro será simulado**

Ao invés de utilizarmos um *shaker* para realizar a simulação do terreno, um atuador pneumático simulará a movimentação do automóvel sobre a suspensão. A entrada não será mais feita com o solo movimentando a suspensão

e esta o carro. A simulação será feita tomando o solo como liso e fazendo a entrada da movimentação do carro através de um atuador pneumático controlado pelo microcomputador. Para saber quanto o computador deve atuar neste atuador pneumático vários cálculos foram desenvolvidos com base em dados reais de automóveis de passeio.

### Controle

A malha de controle a ser utilizada não será mais do tipo fechada pois não serão utilizados sensores que permitam o retorno dos dados para avaliação do erro. Será então utilizado um controle de malha aberta. É sabido que o controle em malha aberta é muito mais impreciso do que a malha fechada porém não há condições para aquisição deste dado.

### Suspensão

A suspensão será constituída de uma mola helicoidal, um amortecedor normal e um atuador pneumático. O controle deste atuador será feito por duas válvulas solenóide que atuarão de modo a aumentar ou diminuir a pressão dentro do pistão.

## ESQUEMA DO MODELO MECÂNICO

O modelo mecânico da suspensão possui os mesmos elementos de uma suspensão convencional:

- mola;
- amortecedor.

Além destes dois componentes há também um cilindro pneumático com duas funções:

1. simular a carga dinâmica do automóvel em movimento;
2. executar o controle da suspensão de modo anular a carga dinâmica.

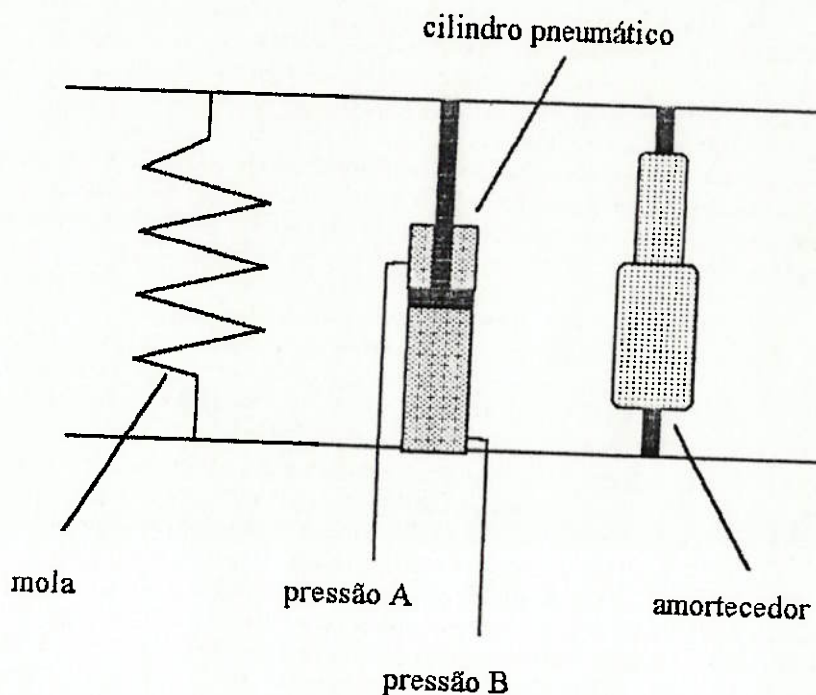


Figura - Esquema do modelo mecânico

O controle da suspensão se dá através da pressão exercida no pistão pneumático de baixo para cima. A simulação da carga do carro é feita através do controle da pressão exercida no pistão pneumática de cima para baixo.

Conforme ilustra a figura a pressão de simulação do veículo é exercida onde atesta 'pressão A' e a pressão de controle do veículo é exercida onde atesta 'pressão B'.

O cilindro pneumático utilizado na construção do modelo não é representativo (carga equivalente a necessária para o real controle do veículo) pois se isto fosse feito o custo da execução do modelo seria muito alto, e como não foi obtido nenhum apoio financeiro para o projeto a viabilidade da construção foi atingida através da escolha de um cilindro menor. Consequentemente a mola também teve de ser modificada de modo a se tornar compatível com a força máxima exercida pelo cilindro.

Terminada a escolha dos elementos, é necessária a escolha de uma estrutura que consiga simular a movimentação de um veículo automotivo. Optou-se por uma caixa de chapas dobradas onde uma placa se movimenta sobre guias. Esta placa será o automóvel. Cabe lembrar que não é necessária a adição de peso sobre esta chapa, já que o cilindro pneumático se encarregará de simular a carga dinâmica + estática do carro.

Uma figura pode ilustrar melhor a estrutura:



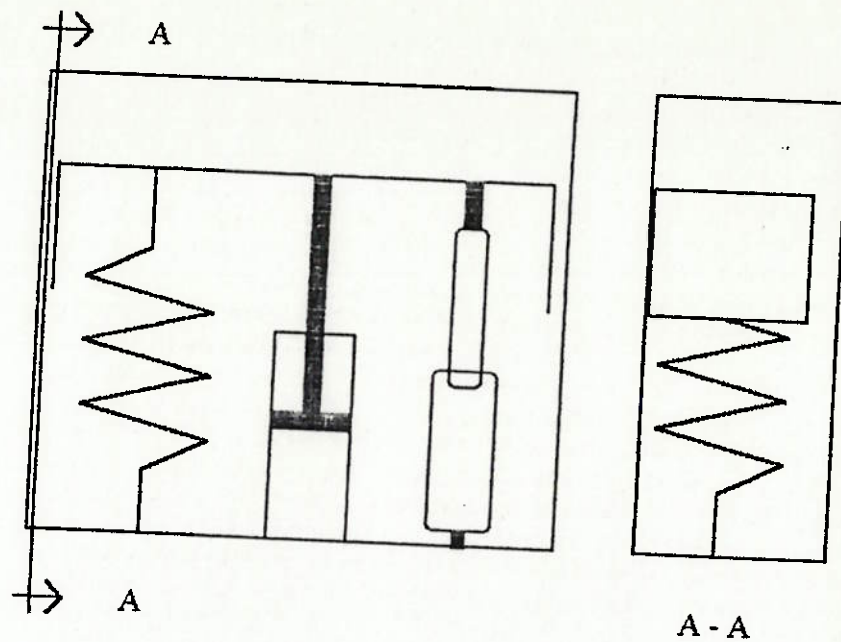


Figura - Esquema da estrutura

As guias lineares de deslizamento feitas para a estrutura do modelo são feitas revestidas de PVC de modo a minimizar o atrito e permitir um melhor funcionamento do modelo.

O sistema pneumático consiste de quatro válvulas solenóide acionadas através de uma placa digital comandada pelo microcomputador. Um programa gerencia a saída do micro para a placa. O esquema das válvulas vem a seguir:

A alimentação do sistema pneumático é feita a partir de uma fonte de pressão pneumática de no mínimo 100psi. O programa deverá controlar as válvulas calculando o tempo que ela deve ficar aberta para permitir um aumento de pressão determinado. Para isso o modelo mecânico deve ser calibrado. A calibragem deve ser feita para cada um dos casos de entrada do sistema. Este processo de calibragem é trabalhoso e muito demorado. No caso da construção de um protótipo (modelo preparado

para aplicação em um veículo real) a calibragem também deverá ser feita. Para execução da calibragem são necessários dados sobre como deve se portar uma suspensão de modo a otimizar o conforto e segurança.

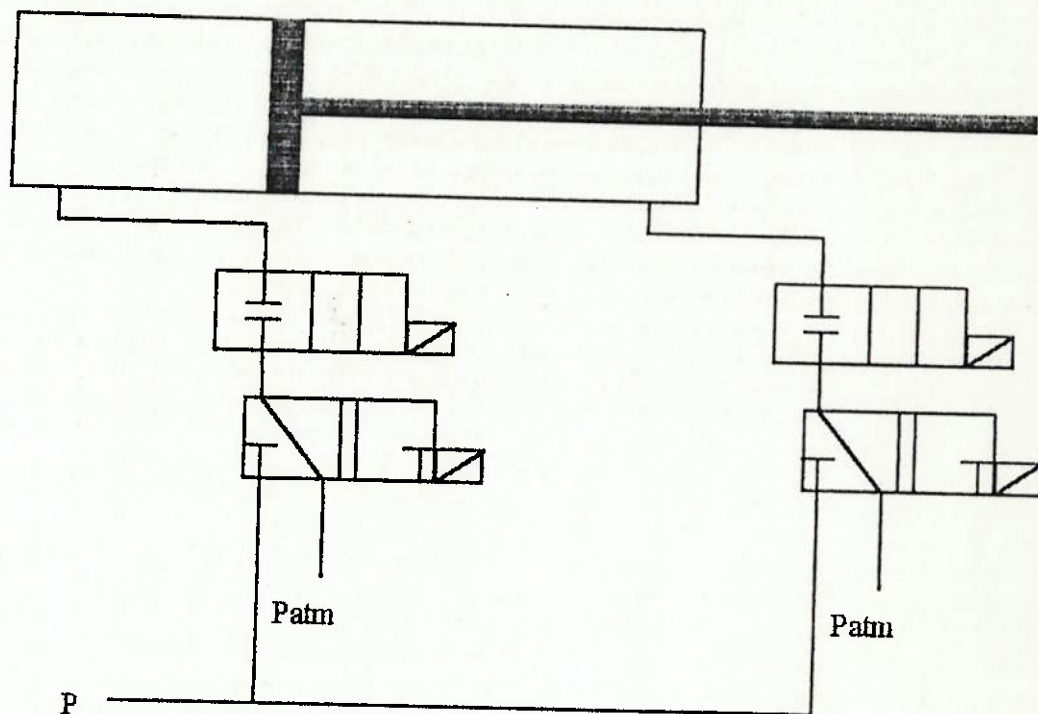


Figura - Sistema pneumático

Nos sistemas de suspensão convencional a escolha de amortecedores e molas sofre uma pré-escolha técnica mas depois passam por avaliações subjetivas. Apesar de obedecerem a alguns critérios estas avaliações não têm como avaliar quantitativamente o desempenho dos sistemas de suspensão. Sendo assim, não há como avaliarmos o sistema de suspensão adotado.

### PLACA DIGITAL

A placa digital tem por finalidade realizar a interface entre o micro e o sistema de válvulas pneumáticas. A interface se faz necessária pois o

microcomputador utilizado fornece dados de voltagem:  $V = 5$  Volts; enquanto que as válvulas trabalham com voltagem:  $V = 24$  Volts.

A placa realiza a tarefa de um sistema de *relé*. O sistema de funcionamento da placa é bastante simples:

- um transistor realiza a energização do ramo onde os contatos da válvula estão conectados. Desta forma assim que o micro envia um sinal (voltagem de ativação de 5V) o transistor liga a válvula.
- um diodo evita que a corrente retorne para o sistema.

A implementação da placa foi realizada com uma *protoboard* e a entrada do sinal do micro através da saída da impressora conectada a um cabo até as válvulas.

A alimentação da placa é feita por um transformador (ou bateria) que fornece 24 V de saída.

O esquema eletrônico da placa digital é a seguinte:

# SUSPENSÃO ATIVA

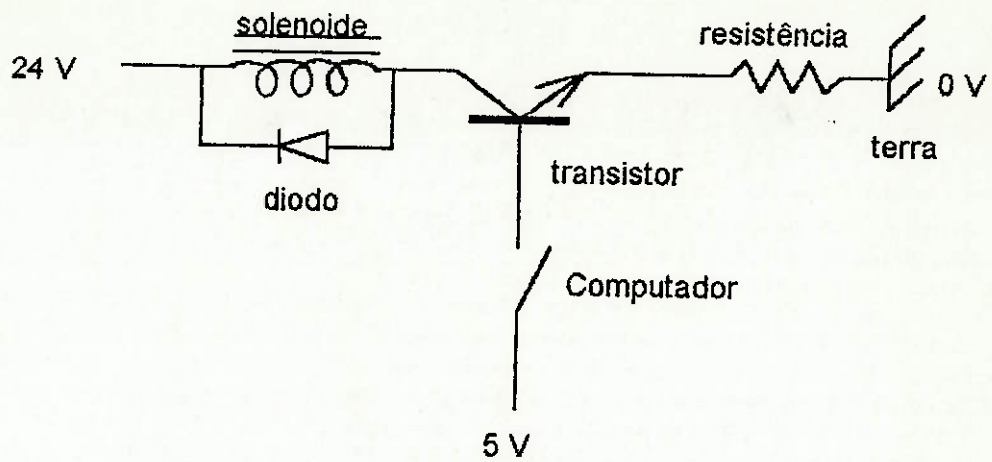


Figura - Esquema elétrico da placa digital.

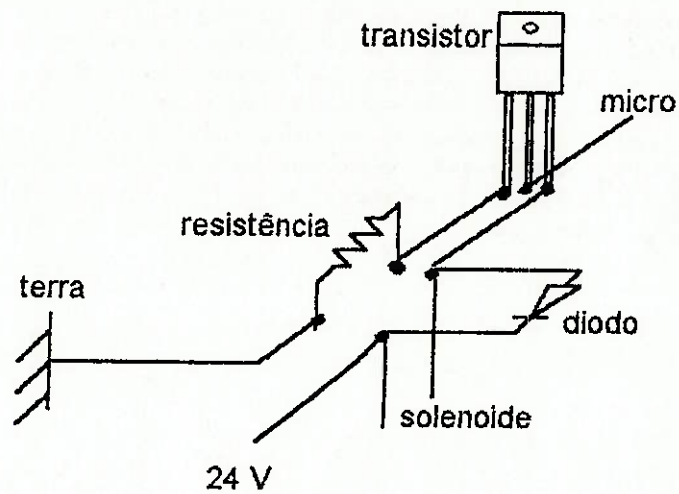


Figura - Esquema de montagem da placa.

## SOFTWARE

O software é o responsável pelo processamento das informações de entrada e cálculo e envio da saída. O programa está escrito em PASCAL e baseado em microcomputadores IBM AT, É composto por três módulos principais:

- Análise
- Driver
- Saída

A principal simplificação é a não consideração do controle do amortecedor, pois não haveria mesmo o controle deste. Assim o programa controla apenas a pressão da mola pneumática.

Procurou-se no programa apresentar de forma simples as entradas do veículo (velocidade, frenagem e curva, acelerações) e o controle da suspensão. A apresentação gráfica desses resultados facilita muito a compreensão desses valores, permitindo um entendimento rápido da situação. A representação da posição das válvulas e das linhas de ar combinando cor, posição e valores permite acompanhar com facilidade o controle do micro sobre o hardware mecânico.

### Análise

O módulo de análise é o corpo principal do programa, sendo responsável pela lógica de controle. A sua principal função é receber os dados de entrada e processá-los para gerar a saída.

Este modo se utiliza de dois outros auxiliares para apresentar os dados e para converter uma saída normalizada para uma saída real.



Esse conceito de saída normalizada é muito prático por permitir que o sistema de análise fique independente do controle que está sendo utilizado. O programa calcula uma faixa de carregamento para cada roda, e envia para o driver de saída esse valor (no caso entre zero e quinze) que vai se preocupar em como fazer essa faixa chegar até o atuador efetivamente.

Outra vantagem desse módulo é a adaptabilidade para diversos veículos diferentes, bastando para isso a refinição das constantes iniciais do programa. No caso montado, utilizou-se um veículo GM OMEGA GLS 2.0 como base para esses dados. Os valores foram extraídos de revistas especializadas, e alguns foram estimados, como por exemplo a altura do Centro de Gravidade.

Preparou-se um arquivo de entrada com uma situação padrão de utilização do veículo, pois o objetivo é calibrar o modelo, e desta forma poderia-se repetir uma mesma entrada sempre e comparar os resultados. Esse arquivo contém a velocidade do veículo, a posição do volante e o estado do pedal de freio do veículo. Alguma inconsistência pode aparecer se esse arquivo não for bem preparado, como por exemplo a existência de acelerações laterais maiores que a admissível pelo veículo, isso deve ser apresentado pelo sistema de controle de saída caso aconteça. Numa implementação real, os procedimentos de leitura do arquivo seriam substituídos por leituras a portas específicas de entrada do hardware, onde estariam conectados os sensores do veículo.

No programa foi instalado um loop de espera que dispara o ciclo de análise a cada intervalo pré-definido, isso evita muita disparidade de funcionamento entre computadores de desempenho diferente (já que 'segura' os computadores mais rápidos) e mantém as acelerações nos níveis corretos (se o ciclo fosse muito rápido, as acelerações seriam majoradas).

Convém salientar que a carga que atua em cada roda durante o ciclo de funcionamento deve considerar o peso próprio do carro, e acrescentá-lo na carga dinâmica. O equacionamento baseia-se no cálculo das acelerações no centro de gravidade do veículo e sua decomposição em cada roda. Essas acelerações são calculadas pela variação da velocidade do veículo, com dados tomados do 'velocímetro', e na aceleração lateral, baseado na posição do volante (e por consequência na posição da roda e raio da curva), e na velocidade do carro. O programa calcula a resposta do carro com uma ligeira antecedência em relação ao comportamento real, já que extrapola a posição do volante para um tempo futuro, em função da velocidade do carro, aceleração longitudinal, posição do volante e velocidade do giro do volante.

#### Driver

A principal função do driver é converter e adaptar o sinal de controle normalizado do programa principal para uma codificação real de controle do sistema.

No caso do sistema montado, o driver converte a faixa de carga recebida em uma faixa de pressão suportada pelo atuador. Isso provoca uma redução de escala no modelo. A maior carga suportada por uma roda foi modelada como aproximadamente 818kgf, mas a maior carga obtida pelo cilindro é de aproximadamente 76kgf. Assim toda o controle do modelo é realizado baseado em uma conversão semelhante. Esse tipo de adaptação foi possível graças à construção modular do software.

A lógica de controle do driver está baseada na suposição de volume constante e transformações isotérmicas. A suposição de volume constante está baseada na situação final desejada, que é o retorno do cilindro à

posição inicial. Alguma imprecisão pode ser provocada por essa modelagem, mas isso implica numa redução na potência de processamento necessária.

Ficaria simples utilizar o mesmo software de controle com outros tipos de circuitos, pois bastaria escrever outro driver. Para a utilização de uma reguladora de pressão (uma situação mais próxima da ideal) o driver não precisaria armazenar os valores de massa atual, e decidir qual o solenóide acionar, bastaria apenas enviar o sinal da pressão desejada para a válvula.

### Saída

O módulo de saída deve apresentar na tela todas as entradas, processamento e resultado de forma mais clara e simples, permitindo um rápido entendimento da situação atual do carro a quem estiver monitorando o veículo. Adotou-se uma forma de apresentação que fosse também visualmente agradável.

Na parte superior da tela têm-se as informações referentes ao movimento longitudinal do veículo. Um velocímetro analógico de grandes dimensões permite uma visualização instantânea da velocidade, dando uma idéia qualitativa muito forte para o operador. No velocímetro analógico têm-se uma idéia melhor da situação do carro, pois compara-se a velocidade com uma escala absoluta. Por exemplo, sabe-se que o carro está devagar se o ponteiro estiver à esquerda da faixa, mesmo que não saiba exatamente qual é essa velocidade.

Um velocímetro digital está na parte superior direita, e fornece a precisão que o velocímetro analógico não consegue apresentar. Aqui pode-se saber exatamente qual a velocidade. Próximo ao velocímetro digital, há o indicador de aceleração longitudinal, que apresenta seus valores em relação à aceleração da gravidade. Essa medida normalmente é mais intuitiva que uma aceleração fornecida em unidades do S.I. Caso surja uma incoerência neste valor,

aceleração maior que a máxima suportada pelo veículo real, o display apresenta o valor da aceleração em vermelho, indicando essa incoerência.

Um relógio, um hodometro e o botão do freio completam o conjunto superior. O relógio real permite que se tenha uma idéia do tempo de trabalho, e está apresentando os valores utilizados pelo processamento. O hodometro, apesar de uma função mais decorativa, permite acompanhar o quanto se utiliza o controle, já que apresenta a kilometragem acumulada de funcionamento. Essa kilometragem não é perdida quando se desliga o micro. O botão de freio representa a frenagem do veículo. Parece estar alto quando o freio está solto e afundado com as letras em vermelho quando se aciona o freio.

Na parte inferior, à esquerda, tem-se as informações relativas ao movimento lateral do carro, com uma representação da posição do volante, e as apresentações digitais da sua posição e da velocidade com que é girado. Aparece também a aceleração lateral, de modo semelhante à longitudinal, com valores em função da aceleração gravitacional e com dígitos vermelhos quando ultrapassa o limite do veículo.

Na parte inferior direita apresenta-se a saída do sistema com o acionamento das válvulas e com a pressão nas linhas do circuito. As cores representam os três diferentes estados de pressão:

- vermelho  $\Rightarrow$  enchendo  $\Rightarrow$  pressão da linha
- azul  $\Rightarrow$  esvaziando  $\Rightarrow$  pressão atmosférica
- preto  $\Rightarrow$  parado  $\Rightarrow$  pressão anterior.



## RESULTADOS

O teste do modelo construído se mostrou bastante útil para avaliação do desempenho do modelo teórico simplificado adotado. As simplificações acabaram por comprometer o comportamento do sistema de modo indesejável. O software, apesar de completo, despreza alguns parâmetros essenciais ao controle do sistema. A resposta do modelo às situações simuladas estiveram aquém do pretendido. A instabilidade não chegou a ocorrer graças a malha escolhida porém o controle não foi suficientemente refinado de modo a buscar a estabilidade através de um amortecimento crítico.

Um dos grandes problemas encontrados pela modelamento foi o fato do cilindro pneumático ter a área de atuação menor que a área de controle. Desta forma quando o programa imprimia pressão ao dois lados do pistão ao mesmo tempo, desejando que ele permanecesse parado, ele se movimentava devido a diferença de forças. O tempo de resposta do sistema não é bom o suficiente para evitar esse efeito indesejado. Uma possível solução para o problema seria a utilização de linhas de pressão diferentes para cada lado do cilindro.

O hardware peca também pela não repetibilidade da simulação do modelo. A cada vez que o programa roda a saída é diferente (quase imperceptivelmente). Isto ocorre devido a amostragem dos dados de entrada não terem uma frequência constante, apresentando oscilações de até 10% de um ciclo para outro.



## CONCLUSÃO

O trabalho de formatura realizado no último ano do curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica não contou com o apoio da instituição de modo a fornecer subsídio técnico e material na confecção do trabalho.

A idéia original do trabalho se baseava no desenvolvimento do material teórico com devida profundidade de modo a consolidar conceitos em uma área ainda muito carente de estudos. Basta perceber o número de trabalhos acessíveis que se referem ao assunto. Seguindo encaminhamento dos professores orientadores o trabalho foi direcionado para a construção de um modelo físico quando o modelo teórico ainda estava em fase de aprimoramento. Este fato introduziu simplificações significativas num estágio inicial que vieram a diminuir a representatividade dos resultados, já que não houve tempo suficiente para avaliar sua sensibilidade. Desta forma o modelo físico foi construído sem o rigor teórico necessário.

Frente a necessidade de confecção de um modelo não foi obtido junto ao Departamento ajuda suficiente no sentido de fornecer material e infraestrutura para tal. Os alunos envolvidos no projeto tiveram seu tempo tomado muitas vezes por demorados procedimentos de modo a obter autorização para utilização de salas de laboratório. Estas salas foram de suma importância para confecção, teste, calibração e validação do modelo. Os alunos acabaram por arcar com as despesas envolvidas (compra de pistão pneumático, válvulas direcionais, solenóides, placa eletrônica, etc.) sem o menor suporte da Escola.

Devido a falta de maturidade do projeto e a simplicidade do modelo os resultados foram apenas demonstrativos. Um estudo mais aprimorado contando com maior infra-estrutura levará a resultados mais significativos.

Apesar de todos os problemas enfrentados os Alunos envolvidos no projeto se sentiram realizados pela execução de um projeto com potencial de aplicação prática.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Mola, Simone; "Fundamentals of vehicle dynamics", General Motors Institute, 1969.
- [2] Yue C. e Botsuen T. e Hedrick J.K.; "Alternative control laws for automotive active suspensions"; ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control; Volume 111, Junho de 1989, páginas 286 a 291.
- [3] Oficina Mecânica, n.48, pág. 6, Motor 3-100 anos do automóvel, pág.78.
- [4] Nori H., Pannala A., Ukrainetz P. e Nikiforuk P.; "Design of an electrohydraulic positioning system using a novel model reference control scheme"; ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control; Volume 111, Junho de 1989, páginas 292 a 297.
- [5] Hrovat D., Margolis D. e Hubbard M.; "An approach toward the optimal semi-active suspension"; ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control; Volume 110, Setembro de 1988, páginas 288 a 296.
- [6] Karnopp D.; "Design Principles for vibration control systems using semi-active dampers"; ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control; Volume 112, Setembro de 1990, páginas 448 a 455.
- [7] Levvit J., Zorka N.; "The influence of tire damping in quarter car active suspension models"; ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control; Volume 113, Março de 1991, páginas 134 a 137.
- [8] Catálogo No. 289, Herion Fuidtronik Industrial Ltda.
- [9] Worcester, Roland, 'Eletrônica', Série Prisma, Edições Melhoramentos, São Paulo, 1976.
- [10] Pappas C. H. e Murray W. H., 'Turbo C++ - Completo e Total', Makron Books do Brasil Editora Ltda., 1991, São Paulo - Brasil
- [11] Norton P., 'Novo guia Peter Norton para programadores do IBM PC&PS/2', Editora Campus, 1991, Rio de Janeiro - Brasil.
- [12] Revista MOTOR 3, número 60, junho de 1990, página 23, Editora Três.
- [13] Revista MOTOR 3, número 71, julho de 1992, página 28, Editora Três.
- [14] Revista MOTOR 3, número 73, setembro de 1992, página 22, Editora Três.
- [15] Malvino, A. P., 'Eletrônica', vol.1, Editora McGraw-Hill, 1986, São Paulo - Brasil.

## APÊNDICE

### Dodge Daytona/Plymouth Roadrunner

Em 1969 foi lançado o Plymouth Roadrunner (alusão ao veloz Roadrunner/Papalégua dos desenhos animados) e seu irmão gêmeo Dodge Roadrunner nos Estados Unidos pela Chrysler para ganhar as competições de Stock-Car. O carro era equipado com um motor V8 426 Hemi (6980 cm<sup>3</sup> e câmaras hemisféricas) com 425 cv de potência. O carro era equipado com uma série de acessórios aerodinâmicos e conseguia atingir 320 km/h. O carro venceu 38 das 48 provas de 1970, como queria a Chrysler, até que uma mudança no regulamento o tirou das pistas. O desempenho do motor era muito superior ao do resto do carro: o veículo freava mal e quase não conseguia fazer curvas devido ao comportamento fraco da suspensão. Esses problemas não eram muitos sentidos nas competições pois a maioria das pistas eram ovais.

### MERCEDES-BENZ

A fábrica alemã Daimler-Benz (fabricantes dos veículos Mercedes-Benz) sempre foi famosa por sua preocupação com a segurança, demonstrada insistentemente nas suas campanhas de Marketing. Um bom exemplo disso é uma propaganda em que um jovem executivo saía do emprego no final do dia e entrava num Mercedes-Benz. Colocava o cinto de segurança e partia em alta velocidade. Entrava em uma estrada sinuosa na encosta de uma montanha e, ainda em alta velocidade, perdia a direção e caía pela encosta. Aparecia então o motorista saindo meio tonto do carro completamente destruído enquanto aparecia na tela "Ele só saiu do carro porque era um Mercedes!".



## ESCORT XR3 FÓRMULA

A Ford lançou em setembro de 1991 uma série limitada do Escort denominado XR# Fórmula, com 750 unidades que tinha como principal característica os amortecedores com variação no coeficiente de amortecimento. Para conseguir isso, os amortecedores tem uma válvula elétrica situada no interior do amortecedor, no pistão que separa as câmaras. A válvula é controlada por uma central eletrônica, que manda um sinal elétrico para esta, fechando uma das passagens de óleo em velocidades abaixo de 20 km/h (melhores manobras) e acima de 100 km/h ou freando (por questões de segurança). A partir de 1992, esses amortecedores passaram a ser opcionais, elevando o preço do carro de US\$ 23.300,00 para US\$ 25.000,00 (em janeiro de 1992).

## INFINITI Q45

A suspensão ativa hidráulica desenvolvida pela Nissan Motor Co., foi instalado no ano de 1990 no novo modelo Infiniti Q45, veículos quatro portas sedã de luxo da empresa.

Nesse novo veículo da Nissan, sensores de aceleração foram utilizados para medir a variação da força gravitacional que altera a posição do veículo. Essas forças podem ser causadas por frenagens, acelerações e deformações da pista. Quando o sistema recebe sinal dos sensores, os atuadores hidráulicos agem em cada roda independentemente para manter um bom nível de dirigibilidade com um mínimo de variação na posição do veículo.

O sistema hidráulico atua de tal forma que uma bomba de óleo supre o óleo necessário para o funcionamento do sistema, e um acumulador que elimina pulsações provenientes da linha. O acumulador principal do sistema, mantém a pressão do óleo, compensando uma eventual demanda de óleo. Desta forma, quando a unidade de controle de pressão controla os atuadores, de



acordo com os sinais recebidos dos sensores e processados na unidade de controle eletrônico, este controla a altura do veículo e absorve as forças externas provindas da superfície da pista.

A atuação da suspensão ativa controla os seguintes itens:

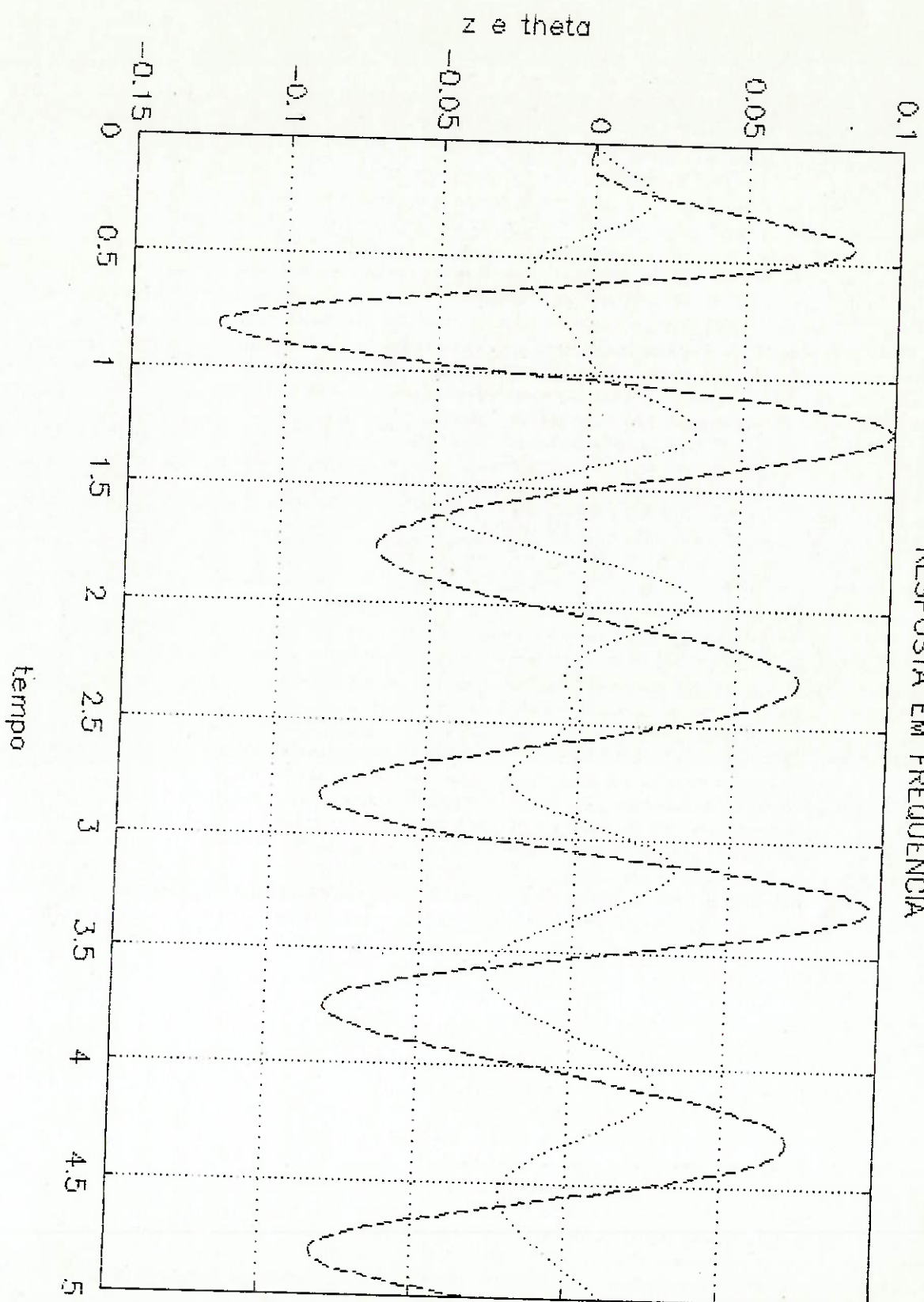
- resposta na curva. Quando o veículo faz uma curva, a inclinação do veículo é compensada pelo aumento da pressão hidráulica nos atuadores das rodas externas e uma diminuição da interna, de acordo com a força de aceleração centrípeta do carro.
- resposta em frenagens e acelerações. Quando o carro está freando, o mergulho do bico do carro é eliminado pelo aumento de pressão hidráulica nos atuadores dianteiros e uma diminuição nos atuadores das rodas traseiras. O mesmo fenômeno ocorre quando em aceleração brusca onde o efeito é o contrário do descrito anteriormente onde a atuação se dá conforme a magnitude da força de aceleração.
- controle da ondulação da pista. Para se limitar o movimento vertical mantendo o veículo como se a pista fosse plana, a pressão hidráulica nos atuadores é controlada conforme a velocidade absoluta na direção vertical. Quando a roda encontra uma saliência na pista, há uma diminuição na pressão do atuador da respectiva roda. Da mesma forma, quando se tem a presença de um buraco na superfície da pista, há um aumento na pressão do atuador.
- controle da altura do veículo. Quando se tem uma variação na altura do veículo devido ao número de passageiros ou uma carga, a mudança é detectada por sensores presentes em cada roda que automaticamente regula a altura, mantendo-o sempre numa posição pré-determinada.

## OUTROS VEÍCULOS

Inúmeros veículos estrangeiros são dotados de suspensão ativa. Porém sempre são em séries muito limitadas, restringindo seu uso a uma pequena classe. As suspensões são feitas sempre sob encomenda, o que as encarece. Dentre os modelos que apresentam esta inovação tecnológica são citados:

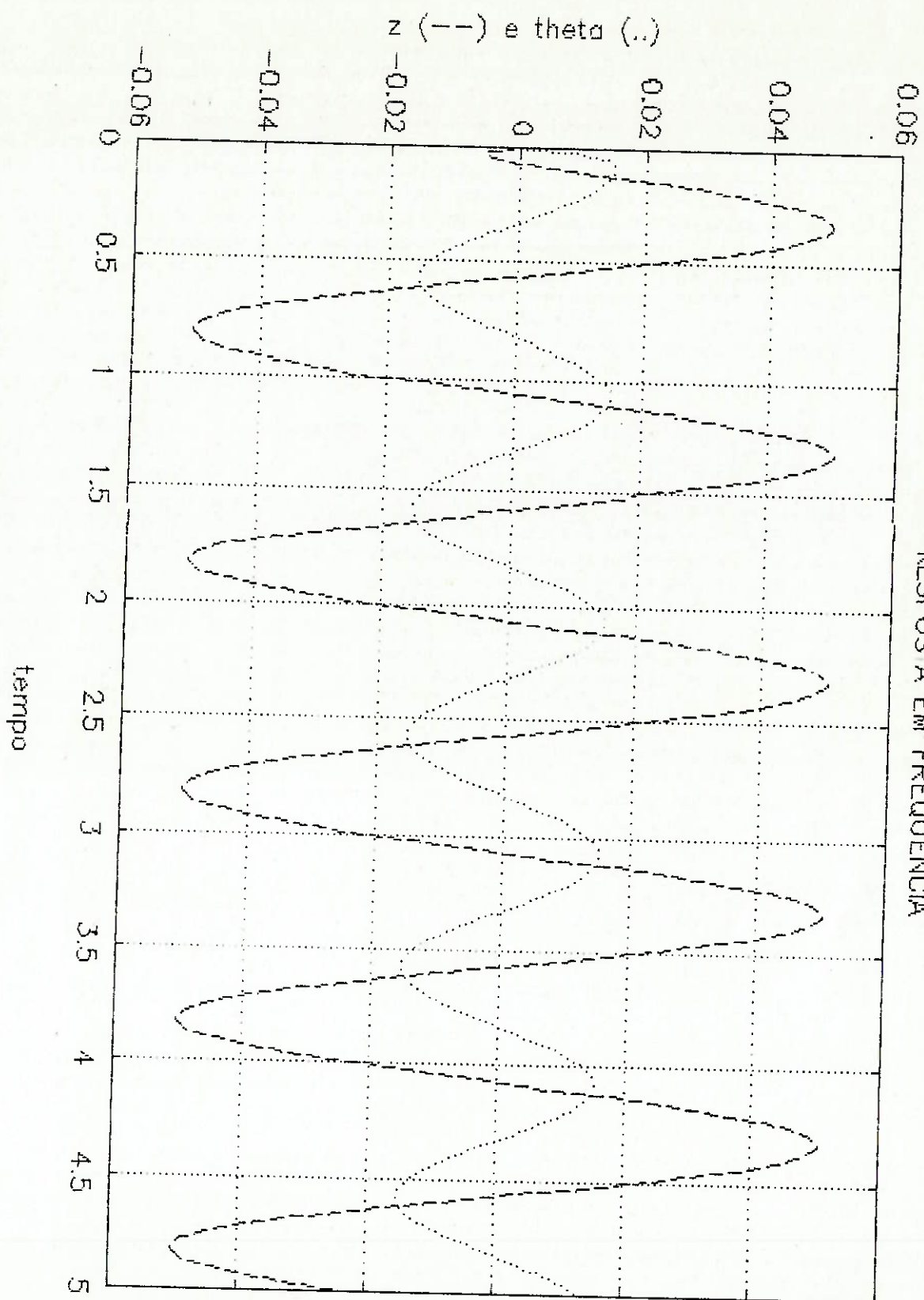
- Mercedes SL
- Bertone Nivola
- Mitsubishi 3000GT HSX
- Mitsubishi Diamante
- CITROEN CX (JÁ NA SEGUNDA GERAÇÃO)

RESPOSTA EM FREQUENCIA



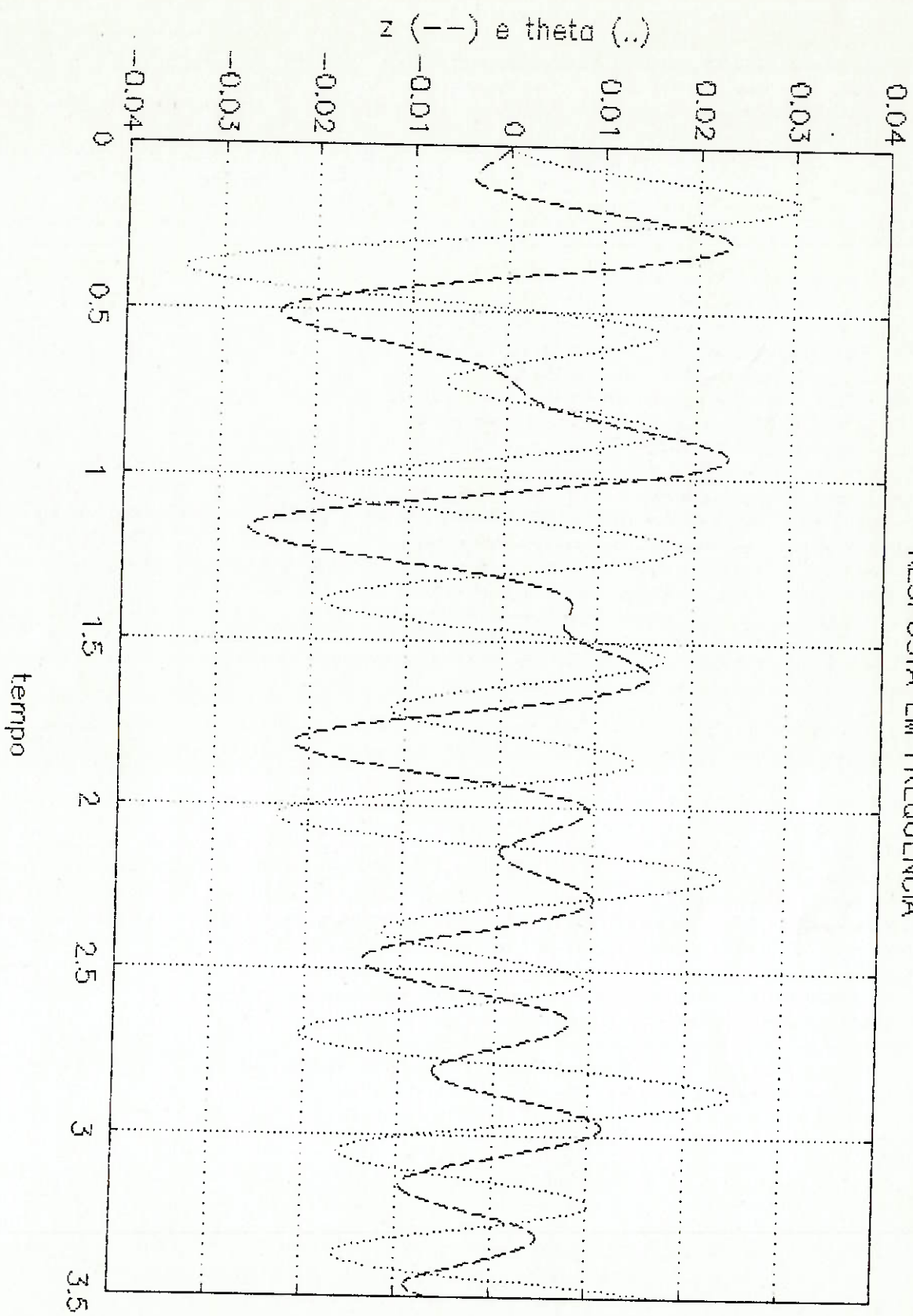
1hz Modulado

RESPOSTA EM FREQUENCIA



3 Hz Original

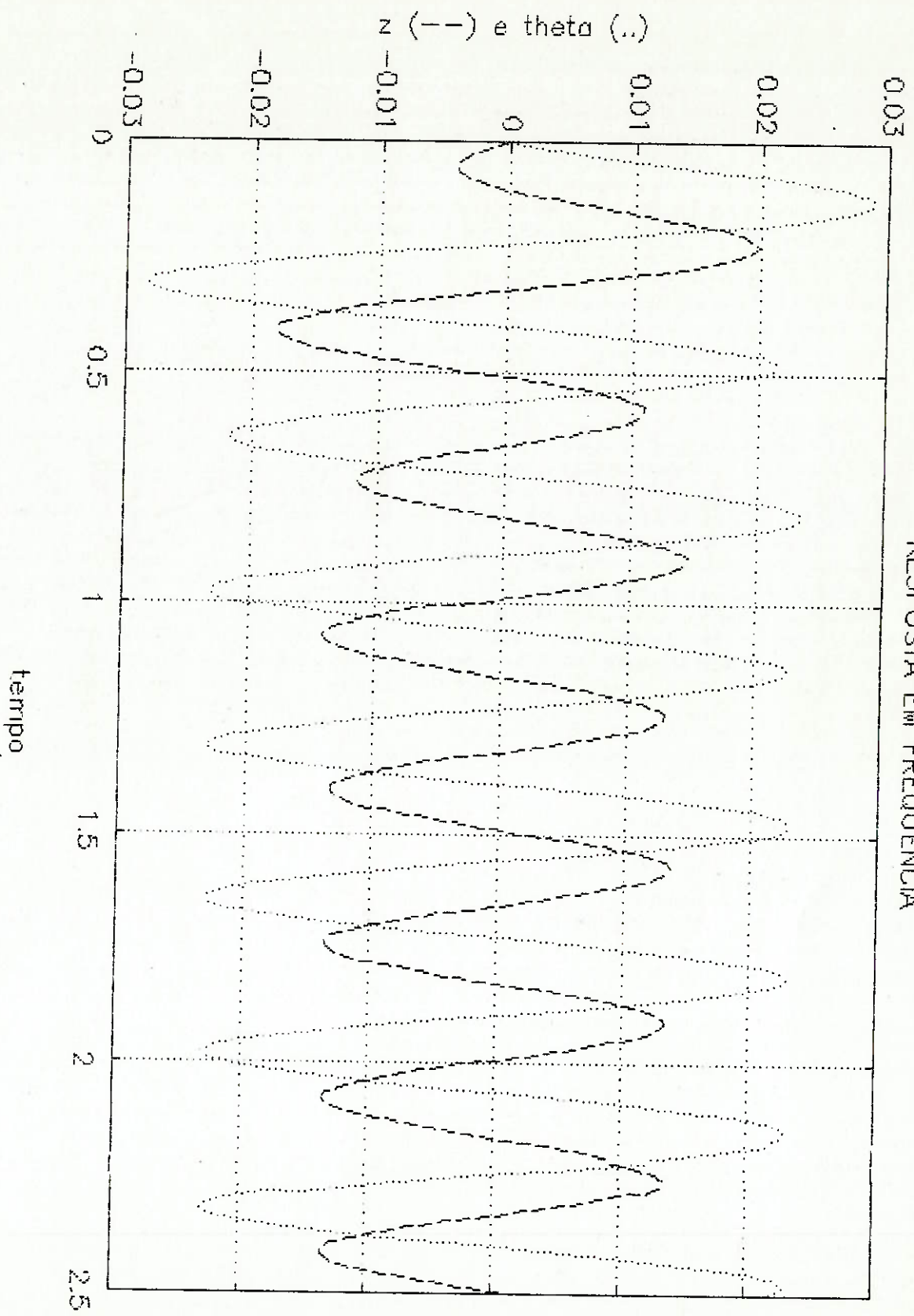
RESPOSTA EM FREQUENCIA





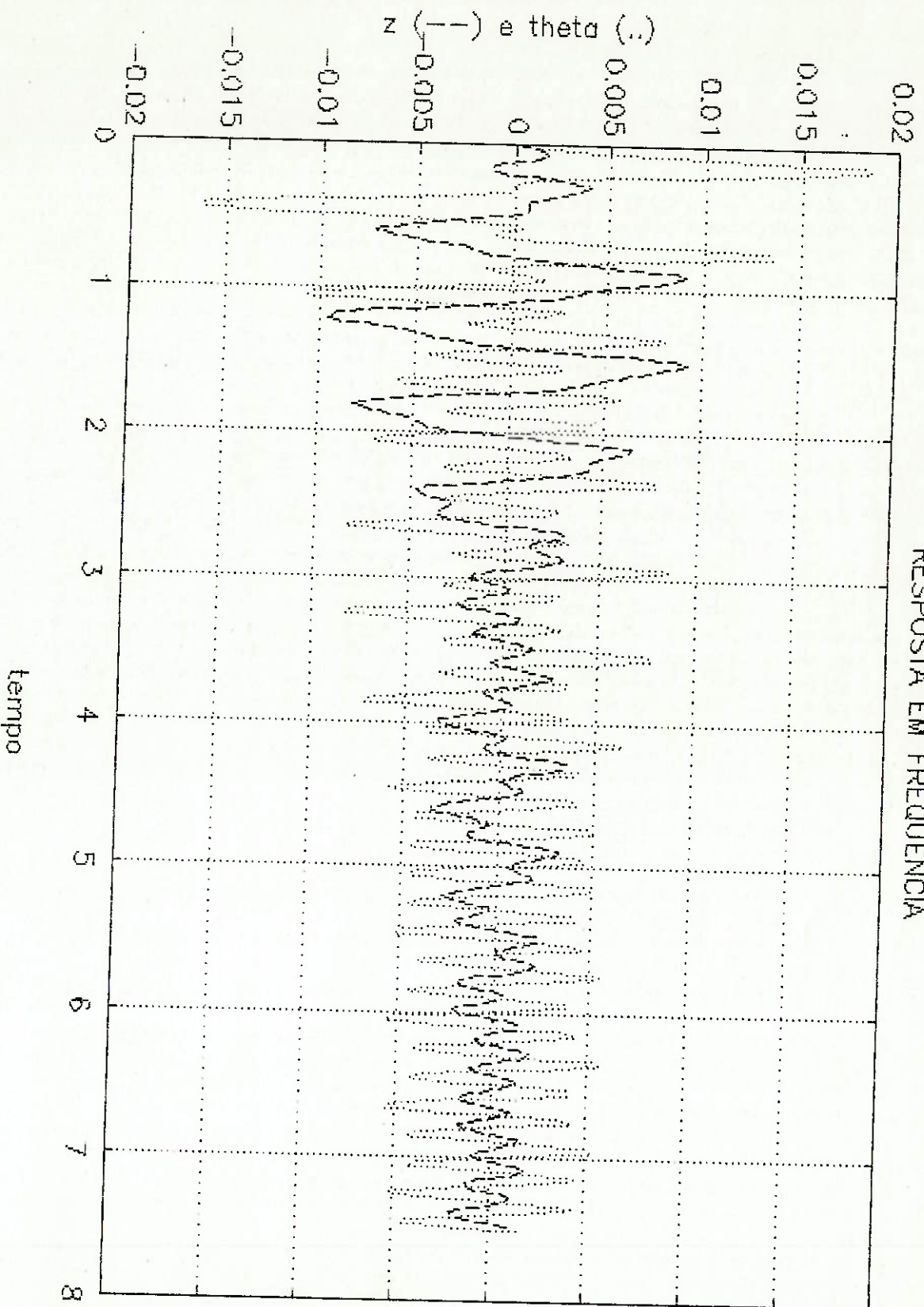
3Hz Modificado

RESPOSTA EM FREQUENCIA



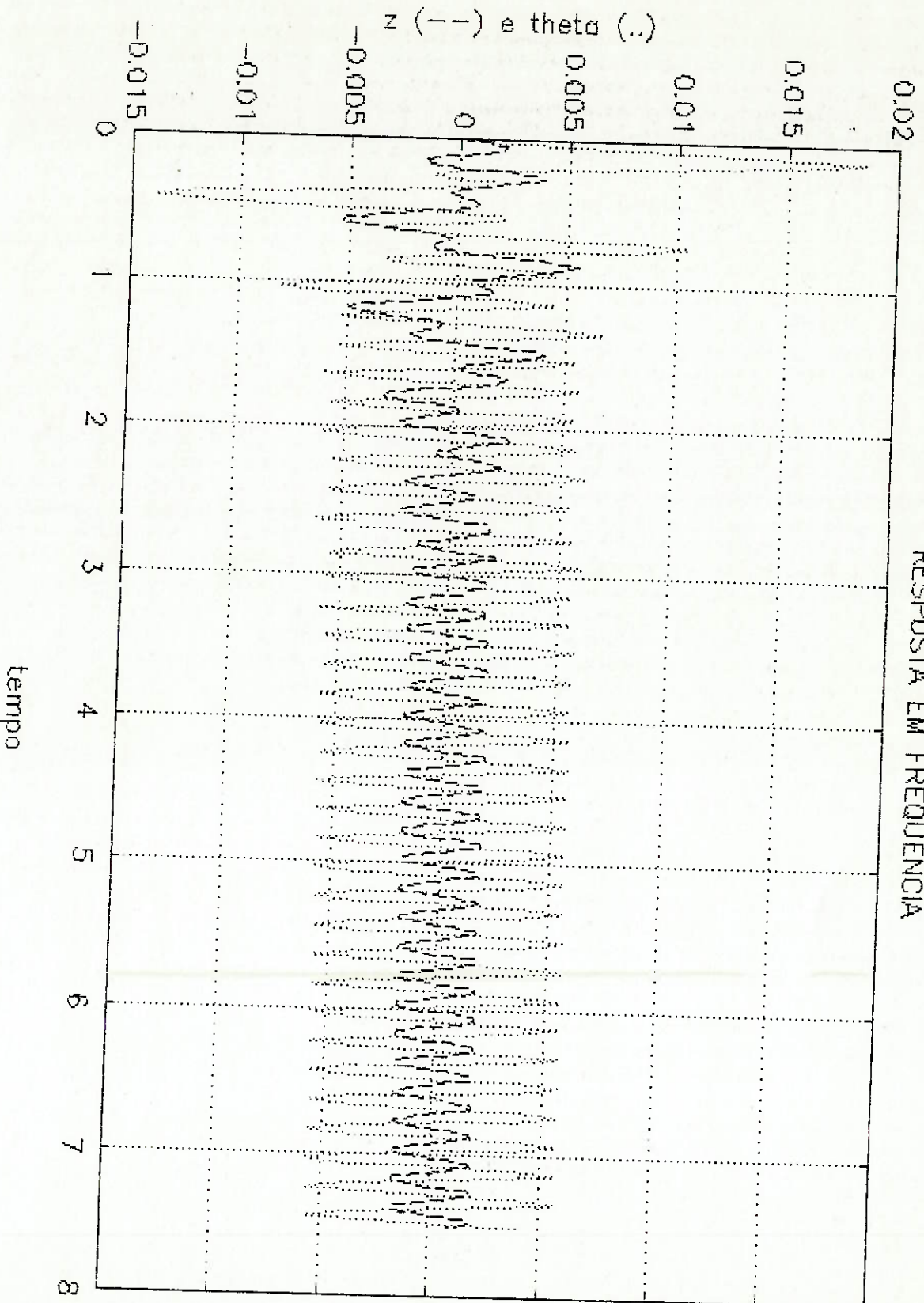
5Hz Original

RESPOSTA EM FREQUENCIA



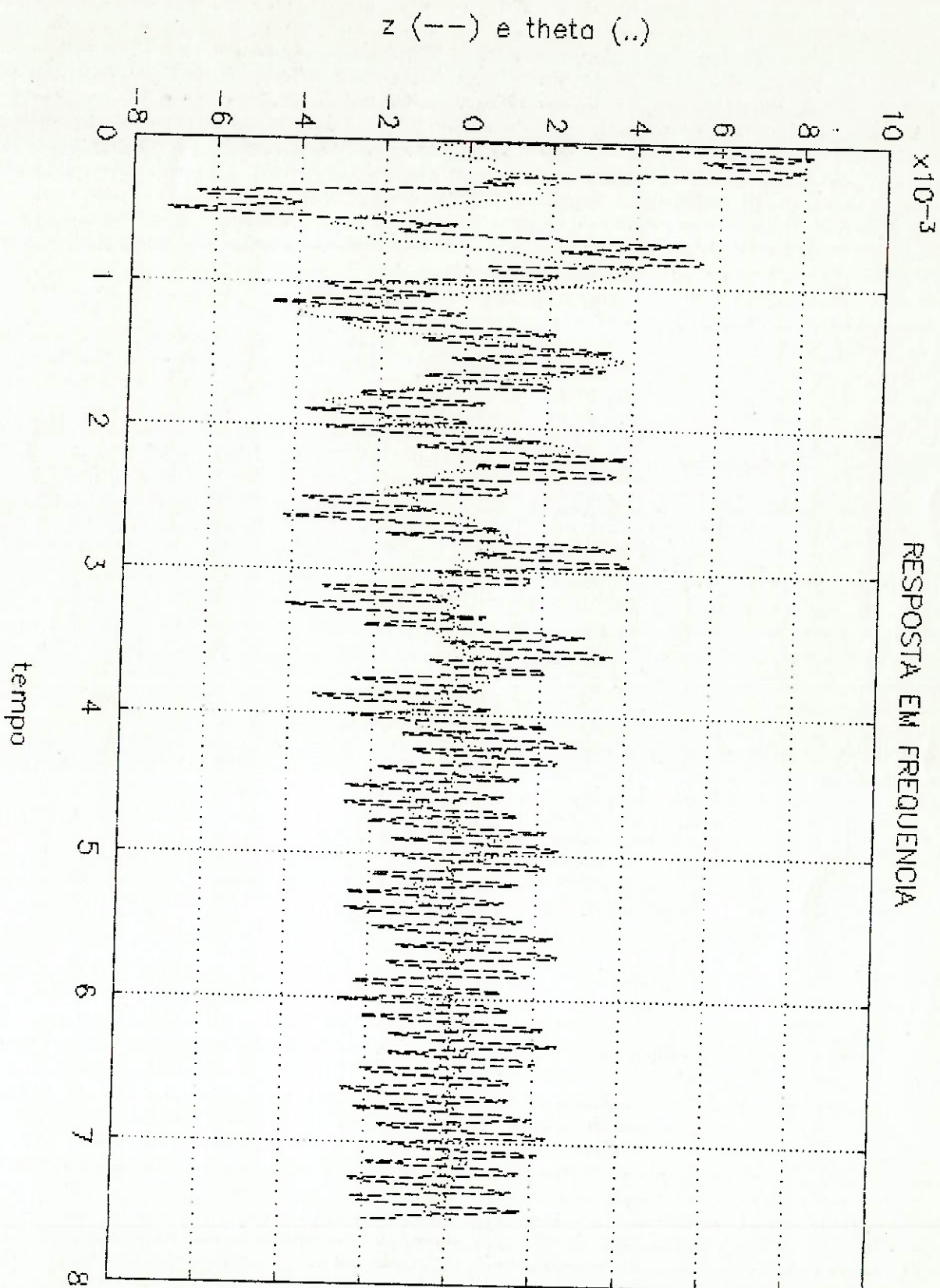
*The Modified*

RESPOSTA EM FREQUENCIA



*8 kHz Original*

RESPOSTA EM FREQUENCIA

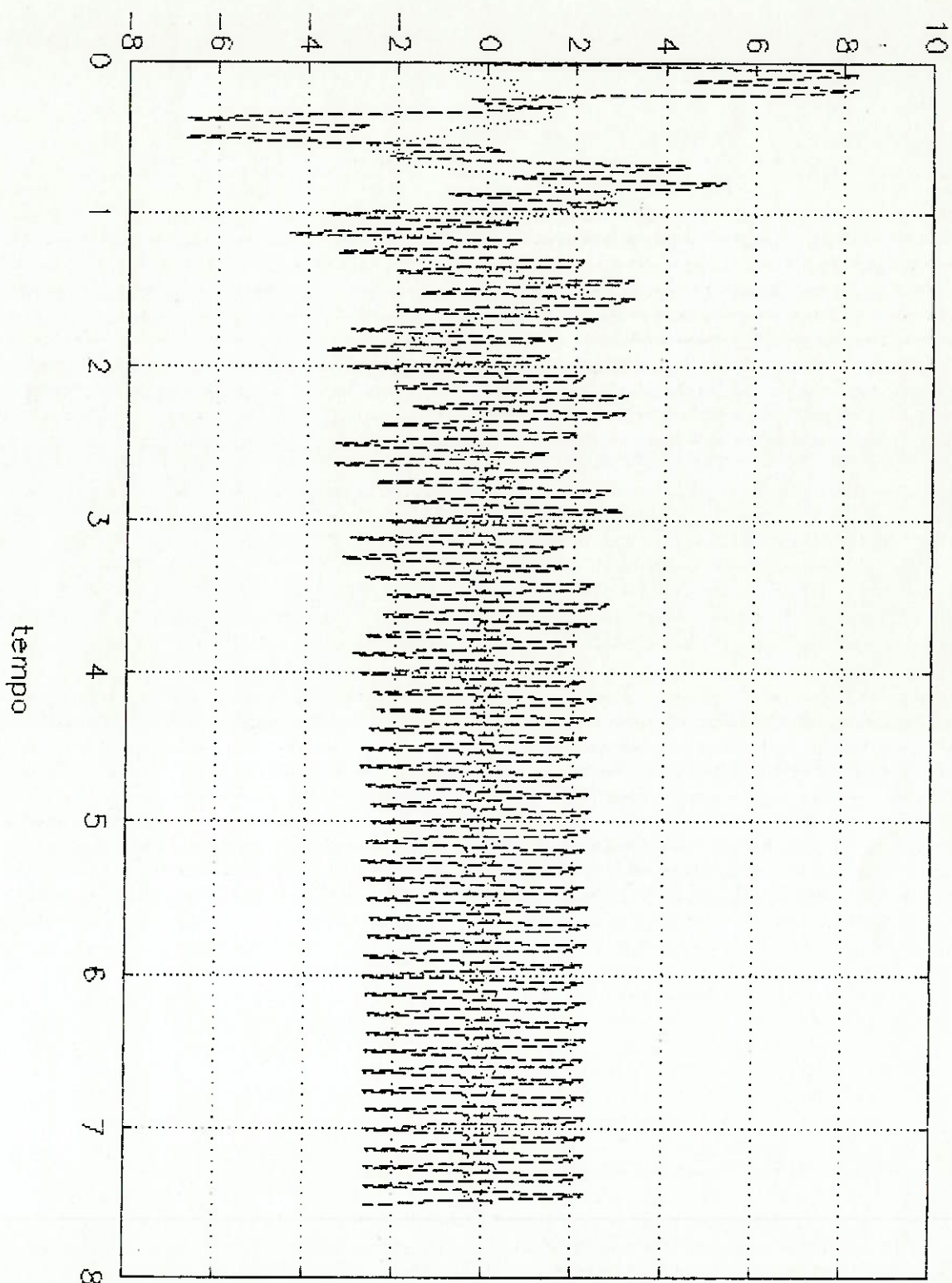


8hz Modificado

RESPOSTA EM FREQUENCIA

$\times 10^{-3}$

$z$  (---) e  $\theta$  (..)



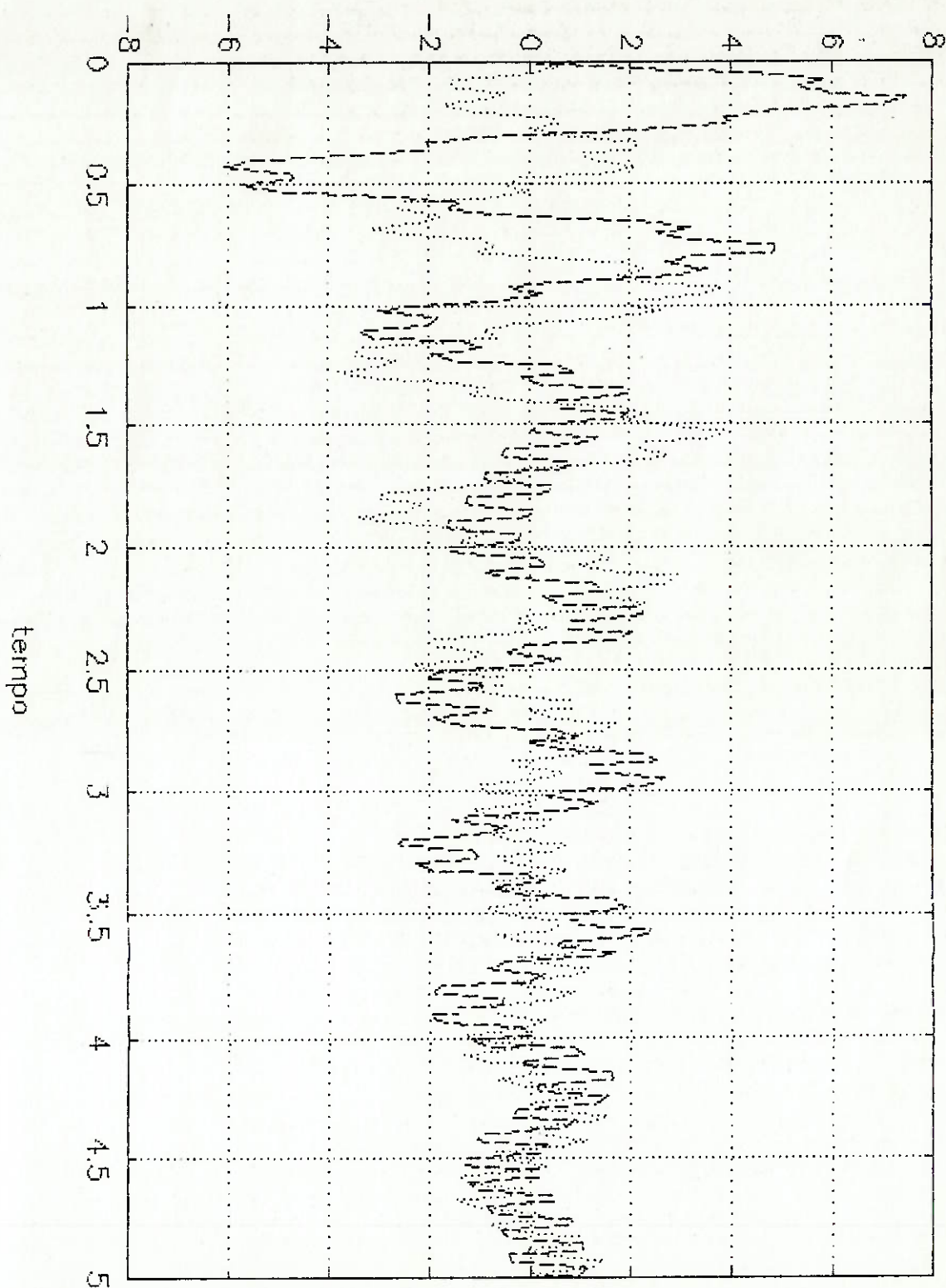


10 Hz original

RESPOSTA EM FREQUENCIA

$\times 10^{-3}$

$z$  (---) e  $\theta$  (..)



10hz Modificado

RESPOSTA EM FREQUENCIA

$\times 10^{-3}$

$z$  (---) e  $\theta$  (..)

