

Sistema de Suspensão Veicular Otimizado por Meio de um Controle Eletromecânico do Conjunto Mola e Amortecedor

José Vitor Mendes da Silva Oliveira
j.vitor.oliveira88@gmail.com
FER

Luan Júnior Silva da Cunha
luanjunior_cunha@hotmail.com
FER

Rodrigo Dias Valente
rodrigo.valente84@gmail.com
FER

Yuri Franklin Machado De Abreu
yuri.fr@ig.com.br
FER

Resumo: O sistema de suspensão de um veículo é diretamente responsável por filtrar as acelerações impostas pelas imperfeições dos pavimentos e de outras fontes de excitações, além de garantir estabilidade, dirigibilidade e performance. Esse sistema vem sendo aperfeiçoado continuamente, e tornou-se tema de grande interesse de engenheiros e projetistas devido a sua grande amplitude e possibilidades de configurações. Este trabalho propõe um projeto de controle eletromecânico para otimizar o sistema de suspensão de um veículo, resultando em uma melhora significativa com relação à performance, sem abrir mão dos compromissos de conforto e segurança. O projeto proposto baseia-se na possibilidade de selecionar estágios de pré-carga das molas, e no controle do fluxo do fluido do amortecedor por meio de válvulas solenoides durante a realização de curvas. Alguns conceitos fundamentais da dinâmica veicular serão abordados, para o embasamento do projeto. Os parâmetros e os resultados serão demonstrados e comprovados através de testes experimentais, e comparações com modelos matemáticos utilizados em softwares de simulação virtual.

Palavras Chave: Suspensões - Válvulas solenoides - Dinâmica veicular - Simulação virtual -

1. INTRODUÇÃO

As estradas dos séculos XVIII e XIX não dispunham de infraestrutura adequada e, por este motivo, os construtores de carruagens passaram a equipar os seus produtos com sistemas de suspensão, que inicialmente utilizavam feixes de molas para ambos os eixos do veículo, devido à simplicidade na manufatura e baixo custo (BARRETO, 2005).

Posteriormente as suspensões de feixes de molas passaram a ser utilizadas apenas nos eixos traseiros dos veículos, e iniciou-se a aplicação de molas helicoidais nos eixos dianteiros. O sistema de suspensão veicular conhecido atualmente, que é composto basicamente por um conjunto de mola e amortecedor, começou a ser estudado e desenvolvido desde o princípio da fabricação de automóveis, com o intuito de tornar o veículo mais confortável e seguro para os passageiros (CRIVELLARO, 2008).

A partir da década de 70 deu-se o início às pesquisas sobre sistemas de suspensão ativa, inovando completamente a área da dinâmica veicular. A proposta desse novo sistema de suspensão aumentaria o desempenho, o desempenho do veículo, o conforto, e a segurança dos passageiros (ALVES, 1998).

Após a década de 90, com o auxílio do computador, os sistemas de suspensão passaram a ser analisados mais detalhadamente. É possível avaliar as características da suspensão e seus componentes através de *softwares* de análises de sistemas multi-corpos e em modelos 3D computadorizados. Além disso, é possível também verificar as respostas do sistema através de estudo do modelo matemático de veículo completo (BARRETO, 2005).

Atualmente o sistema de suspensão vem sendo de grande interesse de diversas áreas da engenharia. A necessidade de melhorar a segurança, o conforto e desempenho é o que impulsiona o desenvolvimento tecnológico de suspensões, pois os veículos deixaram de ser usados esporadicamente e passaram a fazer parte do nosso cotidiano (ANDRADE, 2002).

1.1. SITUAÇÃO PROBLEMA

O conjunto de mola e amortecedor cria problemas de redução da força de atrito entre o pneu e o solo, pois absorve a força peso produzida pela massa do veículo, que deveria ser direcionada para as rodas, e possibilita a transferência de carga para as rodas externas durante as curvas e em mudanças de trajetórias, diminuindo a aderência das rodas internas. Esses efeitos são ocasionados pelo movimento de rolagem da carroceria.

Tais características conflitam com outra característica da suspensão, que é garantir uma aderência suficiente no contato entre o pneu e o pavimento. Assim, há a dificuldade de se manter um compromisso entre os parâmetros de conforto e desempenho, pois eles são inversamente proporcionais. Desta forma o condutor deve se adaptar aos níveis de conforto estipulados pelos projetos dos fabricantes de automóveis, sem ter a possibilidade de selecionar uma configuração que torne o veículo mais adequado ao seu desejo.

A limitação dos fabricantes de automóveis no quesito conforto é estabelecida pelo alto custo de sistemas de suspensões mais sofisticados e a demanda de mão-de-obra especializada para os eventuais reparos. Esses fatos fazem com que seja inviabilizada a aplicação de tais sistemas em veículos populares.

1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é elaborar, desenvolver e implementar um controle eletromecânico de baixo custo em um sistema de suspensão veicular, que tem como finalidade otimizar o comportamento dinâmico do veículo, proporcionando maior estabilidade e segurança em curvas e em mudanças bruscas de trajetória, por meio da controle da rolagem da

carroceria, e aumentando o conforto dos ocupantes, pela possibilidade de selecionar estágios de pré-carga das molas. O dispositivo de controle atuará nas calibrações das forças impostas ao veículo pelos elementos de mola e amortecedor. Este dispositivo poderá ser aplicado em qualquer tipo de veículo.

1.3. JUSTIFICATIVA

A produção deste trabalho apoia-se na necessidade de desenvolver um compromisso entre os parâmetros de conforto, estabilidade, e dirigibilidade em um veículo, visto que atualmente a exigência dos consumidores é cada vez maior.

Diversas desvantagens podem ser encontradas em sistemas de suspensão ativas, embora a aplicação, em termos teóricos, seja bastante eficiente. O sistema ativo tem alto custo quando comparado com os sistemas passivos e a tecnologia empregada demanda gastos de manutenção e baixa confiabilidade. O parâmetro de segurança é seriamente levado em consideração nos sistemas de suspensão ativa, pois qualquer falha que ocorrer poderá desestabilizar completamente o veículo.

Por outro lado, os sistemas semi-ativos são mais confiáveis e possuem maior robustez, mas também apresentam desvantagens em sua utilização. O funcionamento desse sistema pode gerar solavancos, que são ocasionados pelo funcionamento dos componentes aplicados, ocasionando em desconforto aos usuários do veículo (CRIVELLARO, 2008).

Os fatos apresentados inviabilizam a utilização de sistemas de suspensão semi-ativa, ou ativa. Desta forma fica evidenciada a necessidade de se desenvolver um dispositivo que não seja de alto custo de aquisição, não necessite de mão-de-obra especializada, nem aumente o desconforto durante o seu funcionamento, e que garanta conforto e segurança aos ocupantes dos veículos.

1.4. METODOLOGIA

O desenvolvimento do controle eletromecânico proposto inicia-se por uma pesquisa da literatura para identificar quais contribuições outros pesquisadores já fizeram à melhoria do comportamento dinâmico de um veículo, e quais são as principais limitações encontradas em outros projetos de sistemas de suspensão.

Em seguida, é realizada uma fundamentação com os principais conceitos que são utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Também há um tópico sobre o sistema que é proposto por este trabalho e como ocorre o seu funcionamento.

Adicionalmente, realiza-se uma modelagem matemática utilizando dados de um veículo escolhido pelos autores, para entender o seu comportamento dinâmico sem a implementação do projeto proposto. Posteriormente os dados que este trabalho propõe são inseridos no modelo matemático, visando identificar quais serão os efeitos causados pela utilização dos componentes que fazem parte do novo projeto. Os resultados obtidos são expressos através de gráficos, para facilitar a comparação entre a utilização ou não do controle eletromecânico da suspensão. O programa utilizado para a modelagem matemática é o Matlab®/Simulink® da Mathworks.

Por fim será realizada uma comprovação experimental utilizando um veículo equipado com os componentes eletromecânicos propostos.

2. FUNDAMENTAÇÃO

O desenvolvimento do controle de uma suspensão é uma tarefa complexa, sobretudo pela quantidade de parâmetros que devem ser atendidos, para que haja um bom desempenho (ANDRADE, 2002).

As características desejáveis de um sistema de suspensão são (ANDRADE, 2002):

- Isolar a massa suspensa dos impactos produzidos pelas imperfeições das estradas;
- Reduzir a perda de aderência entre o pneu e o solo;
- Garantir o contato dos pneus com o solo em todas as quatro rodas.

Em diversas situações essas características são contraditórias, ou subjetivas, ou não são conhecidas em um sistema de suspensão convencional sob todas as condições de operação. As características desejáveis podem ser estudadas através de modelos matemáticos lineares, ou não lineares, e simulações com diferentes níveis de complexidade de um sistema de suspensão veicular.

2.1. DINÂMICA VEICULAR

A dinâmica veicular, de forma geral, trata da relação entre o veículo e o ambiente onde está se trafegando, e aos comandos impostos pelo condutor, de acordo com a sua necessidade. São estudados os movimentos dos corpos que compõem um veículo, e os esforços que os originam. Os movimentos são divididos em: posições, velocidades e acelerações. Os esforços são originados por dois fenômenos: forças e momentos (BARBIERI, 2011).

Na Figura 1 são mostradas as interações na dinâmica veicular. Esta figura permite entender que o motorista é influenciado por entradas (sensações do veículo, como a estabilidade, a necessidade de acelerar ou freiar, etc.) e distúrbios (sensações fisiológicas, cansaço, estresse, sono, etc.). O motorista atua diretamente no sistema de direção e no sistema de freio/tração, após o cérebro processar as informações das entradas e dos distúrbios. O sistema de direção é capaz de fornecer um *feedback* ao motorista através da sensibilidade no volante, informando se o carro possui boa dirigibilidade e se está estável. Esses dois sistemas influenciam no comportamento dinâmico do veículo. O veículo também sofre distúrbios externos (imperfeições do pavimento, lombadas, buracos, etc.), além das influências dos sistemas de direção e freio/tração, e também fornece *feedback* ao condutor através de mudanças de posições, velocidades e acelerações, que são sentidas na carroceria.

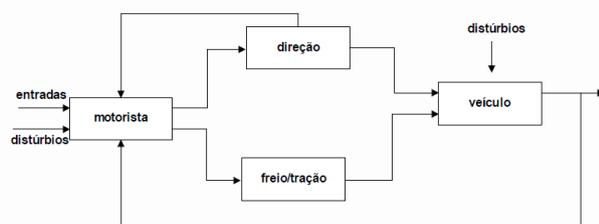


Figura 1: Interações na Dinâmica Veicular – Fonte: BARBIERI, 2011.

O estudo proposto por esse trabalho considera o eixo de coordenadas (direções x, y e z) da SAE, que pode ser visto na Figura 2. A diferença deste eixo de coordenadas para o eixo de coordenadas cartesiano é a inversão do sentido do eixo z, ou seja, o eixo da SAE adota a direção z com o sentido para baixo, enquanto o eixo cartesiano adota a direção z com o sentido para cima.

A dinâmica veicular é comumente dividida em três áreas:

- Lateral: estuda a estabilidade e o comportamento do veículo em condições de esterçamento em baixa, ou alta velocidade. Envolve o movimento lateral (y), e as rotações em torno de z (yaw) e x ($roll$).
- Vertical: estuda os movimentos verticais (z) e as rotações em torno de x ($roll$) e y ($pitch$), em função das irregularidades da pista. Nessa área a segurança e o conforto são levados em consideração.
- Longitudinal: estuda os movimentos longitudinais (x) e as rotações em torno de (y), em função dos torques aplicados durante a aceleração, ou durante a frenagem do veículo. São considerados os desempenhos em aceleração e frenagem, e a capacidade de vencer rampas.

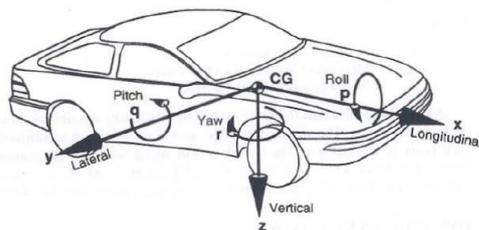


Figura 2: Eixo de coordenadas e os momentos possíveis em cada direção – Fonte: GILLESPIE, 1992.

2.2. SUSPENSÕES

O projeto de uma suspensão deve ser definido basicamente para filtrar as acelerações verticais impostas pelas características da pista onde se está trafegando, resultando em uma redução das amplitudes de vibração da massa suspensa (ganho na percepção de conforto). Além disso, a suspensão deverá garantir o desempenho e a segurança do veículo (PERSEGUIM, 2006). A suspensão é composta, de forma generalizada, por um conjunto mola e amortecedor.

O sistema de suspensão pode ser classificado de acordo com a presença ou não de fontes adicionais de energia em: passivos, semi-passivos e ativos (ANDRADE, 2002):

- Suspensão passiva: é um sistema convencional de fontes não controladas de energia, tais como molas e amortecedores.
- Suspensão semi-ativa: controla o fator de amortecimento, que pode ser variável de acordo com as necessidades e cargas que atual sobre o sistema.
- Suspensão ativa: é caracterizada pela substituição dos componentes passivos por atuadores e sensores.

2.3. MOLAS

Molas são elementos mecânicos elásticos flexíveis. Elas são utilizadas para exercer forças, dar flexibilidade, e armazenar ou absorver energia mecânica. Generalizando, as molas são classificadas como de fio, planas, ou de formato especial.

De acordo com Shigley *et al.* (2004, p.490):

As molas de fio incluem as molas helicoidais de fio redondo e quadrado, feitas para resistir e defletir sob cargas de tração, compressão e torção. As

molas planas incluem os tipos de viga em balanço e elípticos, as molas de potência (...), e arruelas de molas planas (...).

A rigidez de uma mola, que também é conhecida como *rate*, é basicamente a razão entre uma determinada quantidade de força que deve ser aplicada para comprimir a mola em uma unidade de deslocamento.

No veículo avaliado são utilizadas molas helicoidais de compressão (Figura 3) com 18 espiras de fio redondo com 8 mm de espessura. O *rate* de amortecimento dessas molas é de 25 N/mm. Outros veículos, principalmente caminhões e ônibus, utilizam molas do tipo feixe de molas (Figura 4).



Figura 3: Molas helicoidais – Fonte: FREITAS JR; 2011.

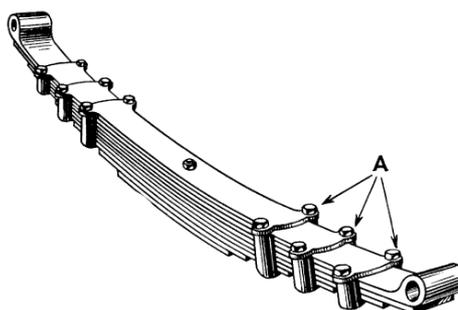


Figura 4: Feixe de molas – Fonte: DIXON, 2007.

2.3.1 FUNÇÃO DA MOLA NO RIDE

Perseguiu (2006) buscou o entendimento das influências dos elementos de uma suspensão na dinâmica do veículo relativa ao *ride*. O *ride* é definido pelo autor como um sistema que transforma as excitações de entrada no veículo em sensações subjetivas relativas a conforto para o motorista. Após ter analisado tais influências, ele apresentou novas métricas para avaliação da dinâmica veicular no *ride*.

A mola tem como função principal armazenar toda a energia brusca proveniente da transposição de algum obstáculo pelo veículo, sem transmitir toda essa energia para a massa suspensa, e evitar deslocamentos severos na mesma (PERSEGUIM, 2006).

2.4. AMORTECEDOR

Segundo Dixon (2007, p.3), os amortecedores são classificados em duas categorias: “os de atrito seco com elementos sólidos, e os hidráulicos com elementos fluídos” (tradução livre dos autores). Essas categorias apresentam ainda outras sub-categorias:

- a) Atrito seco com elementos sólidos:
 - i. Discos deslizantes: Opera com dois braços mecânicos, funcionando similarmente a uma tesoura. É conhecida como *scissor* (Figura 5).
 - ii. Cinta enrolada em torno de blocos: Conhecido como *snubber* (Figura 5).
- b) Hidráulico com elementos fluídos:
 - i. Com alavanca: Utiliza uma alavanca para operar uma palheta. Conhecido como *lever-arm* (Figura 6).

ii. Telescópico: Podem ser de tubo simples, ou tubo duplo. Conhecido como *telescopic* (Figura 6).

Atualmente, os amortecedores mais utilizados são os hidráulicos telescópicos.

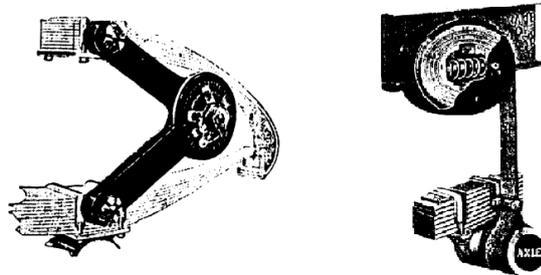


Figura 5: Amortecedor *scissor* (à esquerda) e amortecedor *snubber* (à direita) – Fonte: DIXON, 2007.

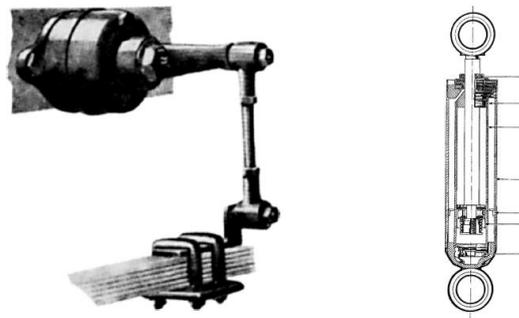


Figura 6: Amortecedor *lever-arm* (à esquerda) e amortecedor telescópico (à direita) – Fonte: DIXON, 2007.

O veículo estudado utiliza um amortecedor hidráulico telescópico de dupla ação, que utiliza nitrogênio industrial como fluido de trabalho. O coeficiente de amortecimento desse dispositivo é de 1500 Ns/m.

2.4.1 FUNÇÃO DO AMORTECEDOR NO RIDE

De acordo com Gillespie (1992, p.156), “ao contrário do que o nome diz, o amortecedor não amortece os impactos provenientes das imperfeições da pista. A suspensão como um todo é responsável por amortecer os impactos, e cabe ao amortecedor apenas dissipar a energia acumulada no sistema” (tradução livre dos autores).

2.5. MASSA SUSPensa E MASSA NÃO SUSPensa

A massa suspensa [*sprung mass*] é definida como todas as massas que estão sobre o sistema de suspensão do veículo, ou seja, toda a carroceria e seus itens internos. A massa não suspensa [*unsprung mass*] é o somatório das massas de todos os componentes que estão ligados à suspensão, mas não são suportados diretamente por ela, ou seja, os pneus, as rodas, os eixos, os freios e o próprio sistema de suspensão (JAZAR, 2008).

2.6. CENTRO DE GRAVIDADE

Centro de gravidade (C.G.) é um ponto geométrico e imaginário onde é considerada a aplicação da força da gravidade e das demais forças que fazem parte do sistema dinâmico do

veículo. Para o estudo das dinâmicas laterais e longitudinais considera-se que todas as massas estão concentradas do no C.G., com propriedades inerciais adequadas. Na análise da dinâmica vertical, normalmente é necessário dividir os veículos em massa suspensa e massa não suspensa (GILLESPIE, 1992). É importante frisar que a posição do C.G. varia de veículo para veículo nas três coordenadas (x, y, z), ou seja: pode estar mais próximo do eixo dianteiro, ou do eixo traseiro (direção “x”); pode estar mais próximo do lado esquerdo, ou do lado direito do veículo (direção “y”); e ainda pode estar mais próximo, ou mais afastado do solo (direção “z”). A representação do C.G. pode ser identificada na Figura 2.

2.7. BOUNCE, PITCH, YAW E ROLL

O *bounce* corresponde ao movimento vertical puro, determinado somente pela dinâmica vertical. Este movimento pode ser facilmente percebido da seguinte forma: quando uma pessoa escolhe o ônibus como meio de transporte e senta no banco que fica sobre uma das rodas, esta pessoa será impulsionada para cima e depois para baixo toda vez que a roda passar por uma imperfeição do pavimento. O movimento de *bounce* gera vibrações e frequências internas nos órgãos dos humanos. A tolerância na direção vertical depende da região analisada: na cavidade abdominal, de 4 a 8 Hz; na cabeça, de 10 a 20 Hz (BARBIERI, 2011).

O *pitch* corresponde ao movimento de acoplamento das dinâmicas vertical e longitudinal. Ele também é facilmente percebido utilizando o exemplo citado anteriormente, porém ao invés de sentar próximo a uma das rodas, deve-se sentar próximo ao meio do ônibus: o passageiro sentirá um efeito “gangorra” toda vez que o ônibus passar por uma imperfeição da pista. O movimento de *pitch* provoca vibrações na massa não suspensa, resultando também em frequências internas nos órgãos dos seres humanos, desta forma aumentando o desconforto. A tolerância de frequência que o homem suporta no sentido longitudinal é de 1 a 2 Hz. A tolerância longitudinal é bem menor do que na direção vertical (BARBIERI, 2011).

O *yaw* é denominado como o movimento que o veículo realiza em torno do eixo “z”, ou seja, são as guinadas do veículo. Esse movimento pode ser provocado pelas forças laterais aplicadas na carroceria, ou pela ação dos ventos (GILLESPIE, 1992).

O movimento de *roll* é basicamente o acoplamento das dinâmicas vertical e lateral. A rolagem de um veículo é percebida nas curvas em velocidade média ou alta, pois o condutor e os passageiros são impulsionados contra as portas do veículo. O *roll* acontece através do *roll axis*, e é medido em unidade angular. Esta representado na Figura 7 pelo ângulo “ Φ ” (BARBIERI, 2011).

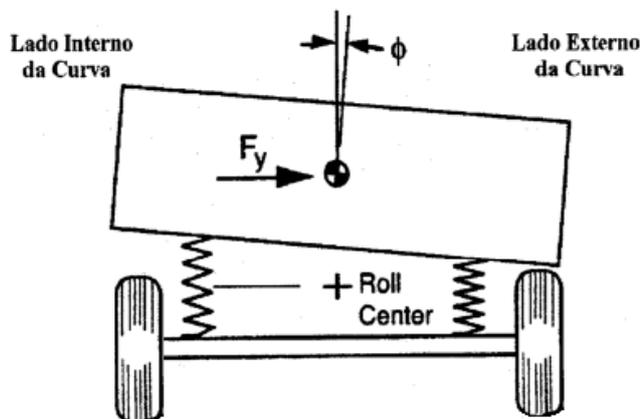


Figura 7: Movimento de roll.

2.8. ROLL CENTER E ROLL AXIS

O *roll center* [centro de rolagem] da suspensão dianteira, ou da suspensão traseira é o centro de rotação da massa suspensa com relação ao solo, ou seja, é o ponto onde as forças laterais são aplicadas no veículo durante as curvas. O *roll axis* [eixo de rolagem] do chassi de um veículo, é obtido a partir da ligação dos pontos do *roll center* da suspensão dianteira e da suspensão traseira (JAZAR, 2008).

A rolagem da massa suspensa acontece devido à atuação de uma força centrífuga, que é produzida durante uma curva, principalmente no C.G. A intensidade desse momento de rolagem depende basicamente do *rate* da mola da suspensão, e da distância entre o *roll axis* e o C.G. (comprimento da alavanca produzida). O *roll center* influencia diretamente na dirigibilidade, no conforto dos ocupantes e na segurança do veículo (BAUER, 2000).

2.9. CONFORTO

Segundo Crivellaro (2008, p.203.):

Algum debate existe para definir qual característica do movimento as pessoas acham desagradável. Deslocamento não é um problema. Se fosse, a sensação de subir degraus produziria desconforto, o que não ocorre, muito embora o esforço para isso seja desconfortável. Da mesma forma, a velocidade não é desconfortável, como evidenciada por pilotos que operam jatos a velocidades superiores a Mach 1, com nenhum efeito danoso.

O mesmo não pode ser dito com relação à variação brusca na intensidade e na direção da aceleração aplicada no veículo e em seus ocupantes (CRIVELLARO, 2008).

O sistema de suspensão é o principal responsável por isolar as frequências de vibração que são transmitidas aos passageiros, pois absorvem os impactos e as irregularidades da superfície do solo. Por isso é importante uma correta seleção do tipo das molas e dos amortecedores a serem utilizados no veículo.

A determinação de conforto pode ser objetiva, ou subjetiva. Além da configuração das molas e dos amortecedores, a percepção de conforto é influenciada por diversos fatores que não se relacionam diretamente com o sistema de suspensão, como: se o assento é ergonômico, a temperatura do habitáculo, a ventilação, o espaço do interior do veículo, se há apoio para os braços e mãos, o nível dos ruídos acústicos, etc (GILLESPIE, 1992).

Existem muitas divergências entre os pesquisadores com relação à determinação de níveis de conforto veicular, visto que cada pessoa reage de uma forma. Duas normas são bastante utilizadas para mensurar e garantir o conforto: ISO 2631 e SAE J1490.

A norma ISO 2631 busca facilitar avaliação e comparação de dados dentro da ciência das vibrações, para posterior determinação dos níveis aceitáveis de exposição do corpo humano a esses efeitos. Ela abrange todos os tipos de veículos (aéreos, terrestres e aquáticos), e máquinas industriais ou de agricultura. A limitação dessa norma está na amplitude da frequência em que o sistema em estudo está submetido, permitindo análises em frequências de 1 a 80 Hz (*INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION*, 1978).

A norma SAE J1409 comenta as desvantagens da utilização de métodos subjetivos para a avaliação dos níveis de exposição à vibrações, e recomenda a utilização de acelerômetros que sejam capazes de medir a vibração nas direções vertical (eixo “z”) e longitudinal (eixo “x”). Ela é utilizada apenas nos estudos de vibrações em veículos, e não faz relacionamento entre as respostas objetivas e subjetivas, nem recomenda limites aceitáveis de exposição às vibrações, ou seja, é uma norma que instrui métodos de como se obter os valores de vibrações de forma adequada (*SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS*, 2011).

2.10. ESTABILIDADE E DIRIGIBILIDADE

O sistema de suspensão deve garantir um balanceamento entre os critérios de conforto e uma boa estabilidade/dirigibilidade, isto faz com que o trabalho de projetistas e engenheiros seja bastante complexo.

A dirigibilidade de um automóvel é um produto das interações entre o pavimento, o veículo e o ambiente (VIEIRA, 2011), podendo ser entendida como capacidade do veículo sair de um movimento em regime permanente e atingir outro movimento. A estabilidade é definida por Barbieri (2011, p.40) como “a tendência decrescente das amplitudes do movimento perturbado de um veículo, após algum tempo do término da perturbação”.

Os termos *cornering* e *handling* são comumente encontrados em literaturas no idioma inglês. O *cornering* trata das grandezas físicas e da capacidade mecânica e dinâmica do veículo, abordando os parâmetros de uma forma mais objetiva. O *handling* aborda as sensações do motorista com relação ao pavimento e ao comportamento do veículo, ou seja, trata da parte subjetiva do estudo (BARBIERI, 2011).

3. SISTEMA PROPOSTO

Devido a uma limitação no sistema de suspensão veicular em que o mesmo não consegue se adaptar a mais de um tipo de aplicação, esse estudo tende a aprimorar o desempenho e a segurança de qualquer veículo utilizando uma válvula solenoide como meio para criar uma obstrução do fluxo do fluido de trabalho do amortecedor, enrijecendo o amortecedor quando auto acionado em situações de curva ou manobras.

Esse projeto é composto por um comando fixado na coluna de direção, que atuará no controle das válvulas solenoides, restringindo o fluxo do fluido de trabalho do amortecedor, de acordo com o sentido das curvas realizadas. Além disto, também é dotado de servomotores que são acoplados a uma relação coroa e engrenagem sem fim, com a finalidade de enrijecer ou expandir as molas de acordo com a seleção do condutor.

3.1. APLICAÇÃO DO PROJETO

A SAE Internacional [Sociedade de Engenheiros da Mobilidade] é uma entidade que cria regulamentações, realiza congressos, oferece cursos e palestras, além de promover

diversos eventos para estimular os profissionais e os estudantes de graduação em Engenharia no Brasil através da sua filial SAE Brasil.

Um desses eventos é o MiniBAJA SAE, que consiste na concepção e desenvolvimento de um veículo de competição monoposto e *off-road*, para a realização de provas dinâmicas (aceleração, conforto, *suspension & traction*, enduro, etc.) e provas estáticas (apresentação do projeto, avaliação de segurança do veículo, avaliação do sistema de abastecimento, etc.).

O veículo utilizado no desenvolvimento deste trabalho participa do evento MiniBAJA SAE. Essa escolha se deu devido à complexidade do seu projeto, e a exigência de que altas performances sejam alcançadas nas rigorosas provas dinâmicas durante as competições.

Outros motivos também justificam a escolha desse veículo para a implementação e teste do sistema proposto:

- 1) Disponibilidade do veículo na instituição onde este trabalho está sendo desenvolvido. O veículo é denominado como AEDBaja, e pertence a Faculdade de Engenharia de Resende.
- 2) Necessidade de utilizar recursos que demandem baixo investimento e pouca mão-de-obra, visto que essas são algumas das premissas do evento MiniBAJA SAE, além de diversas limitações técnicas serem impostas pelas regulamentações da competição, como as definições de construção do veículo que devem ser obedecidas para garantir a segurança dos ocupantes, impossibilidade de alteração do sistema de exaustão do motor, etc.

3.2. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Por intermédio de dois interruptores (um para comprimir e outro para expandir a mola) fixados ao painel do veículo e um relé pré-temporizado, o condutor poderá escolher entre três tipos de configurações pré-determinadas da rigidez da mola. A informação gerada pelo interruptor é enviada ao servo-motor que iniciará o movimento rotacional no limitador superior da mola durante o período de tempo pré-determinado pelo relé. Por ter um contato rosqueado com o corpo do amortecedor, o mesmo irá comprimir ou expandir a mola, resultando em uma alteração no *rate*. Este dispositivo deverá ser acionado apenas com o veículo parado, já que exige um atraso para realizar o trabalho completo de compressão e expansão da mola, além de requerer um acionamento manual do condutor. A Figura 8 apresenta o esquema elétrico do equipamento que controla a pré-carga das molas.

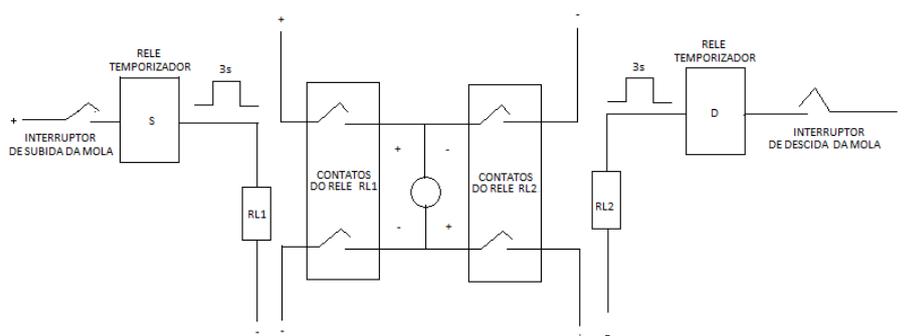


Figura 8: Esquema elétrico das configurações de rigidez das molas - Fonte: Os próprios autores

Quando o interruptor de subida da mola é acionado, energiza o relé temporizador pré-ajustado. A tensão positiva irá energizar o relé RL1. Os contatos deste relé, que estão normalmente abertos, se fecharão e polarizarão o motor no sentido de rotação anti-horário.

Ao acionar o interruptor de descida da mola, o relé temporizador pré-ajustado irá energizar com uma tensão positiva o relé RL2. Os contatos deste relé, que estão normalmente abertos, se fecharão e polarizarão o motor no sentido de rotação horário.

O outro dispositivo funcionará por meio de válvulas solenoides, que é um componente eletromecânico, responsável por restringir ou liberar a passagem do fluido através de controle elétrico, que serão controladas através de um conjunto de pistas de contato situados na coluna de direção, o que garante alta robustez e rapidez da entrada de informação no sistema. O dispositivo entra em ação quando o condutor esterçar o volante para qualquer lado. Desta forma a válvula solenoide aplicada no amortecedor do lado externo à curva deverá entrar em ação, tornando o sistema mais rígido, através da obstrução instantânea da passagem do fluido entre o seu corpo e o cilindro de expansão. O mesmo deverá acontecer quando o volante for esterçado para o outro lado. A válvula solenoide, devido ao seu retorno por mola, retornará para a posição aberta no momento em que o volante se alinhar. A Figura 9 demonstra o esquema elétrico de funcionamento das válvulas solenoides.

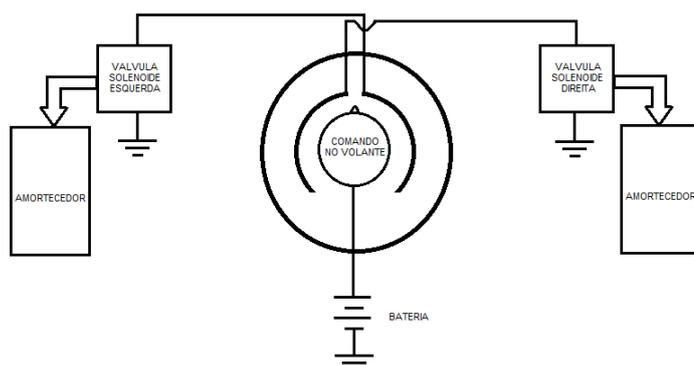


Figura 9: Esquema elétrico das configurações de rigidez dos amortecedores - Fonte: Os próprios autores.

4. SIMULAÇÃO

4.1 MODELO

Na Figura 10 apresenta-se um modelo para uma análise de coerência de resultados proposto na bibliografia JAZAR (2008) que utiliza o método de Newton-Euler para as equações diretas de movimento de um veículo completo implementado em MATLAB/SIMULINK.

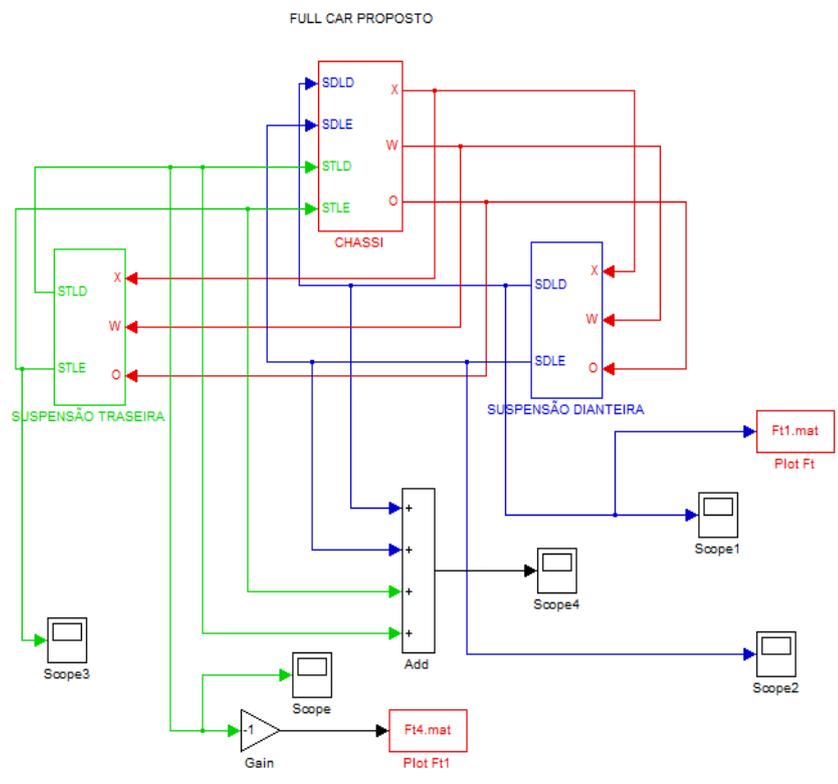


Figura 10: Modelo de veículo completo em ambiente SIMULINK - Fonte: Os próprios autores

A simulação é feita a partir de um veículo que se encontra estável e realiza uma conversão para a esquerda de 3 metros de raio uma velocidade de 5m/s (aproximadamente 20km/h).

4.2 ANALISE

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam os deslocamentos de “roll” e as forças transmitidas ao solo do lado direito dos três modelos, que apresentam os mesmos parâmetros, apresentados na Tabela 1, porém se diferenciando pela sua aplicação, em que temos a situação atual, onde a suspensão não possui nenhum tipo de dispositivo, a situação proposta por esse trabalho em que adicionamos as válvulas solenoides em cada um dos amortecedores do veículo e a situação considerada como ideal para o Baja, que por ser um veículo de competição *off road*, se torna interessante a capacidade do mesmo em perder o a força de contato com as rodas traseiras.

<i>Dados</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Carga eixo dianteiro	130	kg
Carga eixo traseiro	150	kg
Critério de carregamento	2,5	g

Ângulo do amortecedor dianteiro	35	graus
Ângulo do amortecedor traseiro	50	graus
Curso amortecedor dianteiro	110	mm
Curso amortecedor traseiro	110	mm
Fração de amortecimento	0,6	-

Tabela 1: Dados utilizados no Matlab®/Simulink®.

[H1] Comentário: A tabela não pode “surgir nada”. Precisa ser chamada no texto.

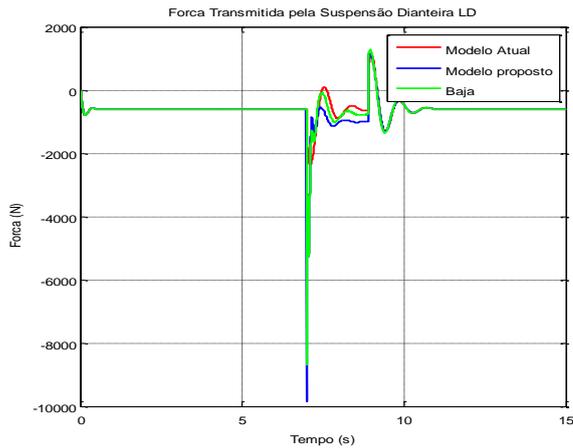


Figura 11: Força transmitida pela suspensão dianteira LD - Fonte: Os próprios autores

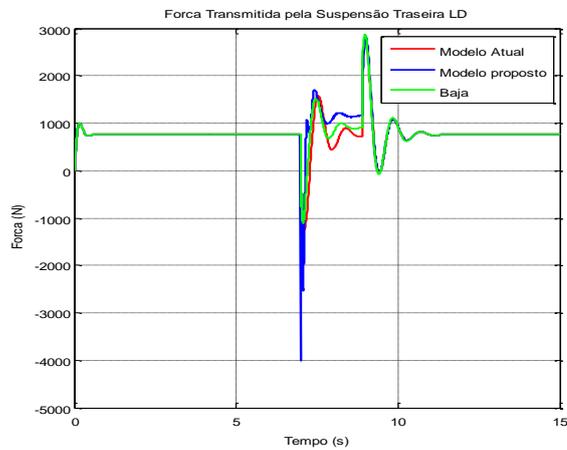


Figura 12: Força transmitida pela suspensão traseira LD - Fonte: Os próprios autores

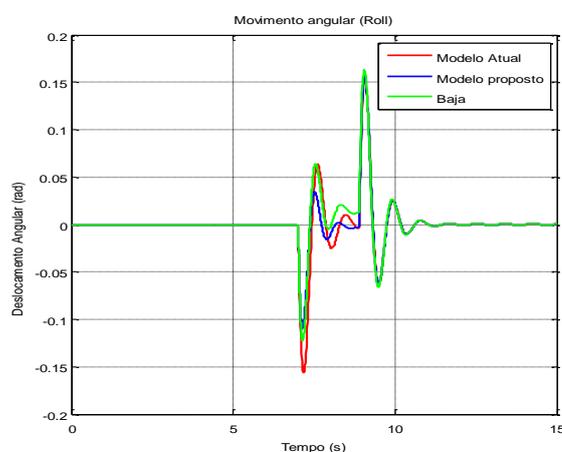


Figura 13: Movimento angular (*Roll*) - Fonte: Os próprios autores

Pode se observar comparando os resultados obtidos no gráfico da Figura 11 uma aproximação entre o modelo proposto e o modelo sugerido ao Baja quanto ao pico das forças transmitida ao solo pelo pneu dianteiro do lado direito, mantendo-se mais altas que no modelo que representa o veículo atual, durante o intervalo da curva, o que proporciona uma maior força normal, evitando o escorregamento lateral.

No gráfico da Figura 12 que mostra as forças transmitidas ao solo pelo pneu traseiro do lado direito, o modelo proposto, devido sua configuração também apresenta um pico de força de maior amplitude no início da simulação que se mantém mais alta que os demais modelos até o término da curva, o que somados aos efeitos vistos na Figura 11, proporcionam uma redução no deslocamento angular de rolagem do veículo, conforme o gráfico da Figura 13, o que resulta em um maior conforto e estabilidade.

5. CONCLUSÕES

O modelo evidenciou que o desenvolvimento do dispositivo irá contribuir significativamente no controle dos parâmetros que influenciam na dinâmica de um sistema de suspensão reduzindo a rolagem [*roll*] do veículo durante uma curva, o que resultará em uma maior força de contato entre o pneu e o pavimento, possibilitando obter ganhos que atendem tanto as condições de *riding*, como de *handling*.

O veículo protótipo está em fase de desenvolvimento, e posteriormente serão realizados testes experimentais para comparação com o modelo virtual, e comprovação da funcionalidade do projeto proposto por este trabalho.

6. REFERÊNCIAS

ALVES, Paulo S. L. **Análise comparativa do desempenho de uma suspensão veicular considerando elementos passivos e ativos**. São Paulo, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1998 (Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica), 131 p. São Paulo, 1997, Universidade Estadual de Campinas.

ANDRADE, Antonio F. A. **Controle de suspensões ativas utilizando redes neurais**. São Paulo, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2002 (Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica), 155p. São Paulo, 2001, Universidade Estadual de Campinas.

BARBIERI, Frederico. **Dinâmica Veicular Básica**. São Paulo, 2011, 243 p. **Apostila do curso de dinâmica veicular básica** – Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade do Brasil.



BARRETO, Marco A. Z. **Dinâmica longitudinal: Efeitos da geometria de suspensão nas mudanças de atitude da massa suspensa e esforços nos elementos de suspensão.** São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2005 (Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica), 110 p. São Paulo, 2004, Universidade de São Paulo.

BAUER, Horst. **Bosch Automotive Handbook.** 5ª ed. Robert Bosch GmbH: Stuttgart, 2000.

CRIVELLARO, Cláudio. **Controle robusto de suspensão semi-ativa para caminhonetes utilizando amortecedores magneto-reológicos – v.2.** São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009 (Tese Doutorado em Engenharia Mecânica). 438 p. São Paulo, 2008, Universidade de São Paulo.

DIXON, John C. **The Shock Absorber Handbook.** 2ª ed. West Sussex: Professional Engineering Publishing Ltd and John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

FREITAS JR; Luís Mauro P. **Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo Macpherson.** São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011 (Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica), 131 p. São Paulo, 2006, Universidade de São Paulo.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics.** R-114. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc; 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Guia para avaliação da exposição humana à vibrações de corpo inteiro, ISO 2631, 15 janeiro 1978, 2ª ed.

JAZAR, Reza N. **Vehicle Dynamics: Theory and Application.** 1ª ed. Riverdale: Springer, 2008.

PERSEGUIM, Odilon T. **Dinâmica veicular relativa ao ride de veículos e métricas para a sua avaliação.** São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2006 (Tese Doutorado em Engenharia Mecânica), 221 p. São Paulo, 2005, Universidade de São Paulo.

SHIGLEY, Joseph E. *et al.* **Projetos de Engenharia Mecânica.** 7ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Measurement and Presentation of Truck Ride Vibrations,** SAE J1490, 17 maio 2011, 2ª ed.

VIEIRA, Januário L. de M. **Estudo de dirigibilidade de veículos longos combinados.** São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011 (Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica). 93 p. São Paulo, 2010, Universidade de São Paulo.