

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



DEM - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE MOVIMENTOS VERTICAIS COM ATUAÇÃO PNEUMÁTICA

*Allan Nogueira de Albuquerque¹,
Marco Antonio Meggiolaro².*



¹ Aluno de Graduação do curso de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

² Eng. Mecânico, Ph.D., Professor Assistente do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

RESUMO

Neste projeto, foram desenvolvidos dois simuladores de movimentos com atuação pneumática, uma Plataforma Stewart e um Simulador Vertical (4-Post Rig). A primeira consiste em duas placas hexagonais, uma fixa (base) e uma móvel (topo), acopladas por seis cilindros pneumáticos por meio de juntas universais. A segunda consiste em quatro cilindros fixos com suas hastes terminadas em uma base para o apoio das rodas de um veículo em escala.

O projeto das plataformas de simulação foi feito usando o programa *SolidWorks*. Neste, foram realizados desenhos tridimensionais de cada componente e então, estes foram encaixados em ambiente virtual. O principal requisito levado em consideração no projeto foi o tamanho, que deveria ser compatível com os veículos em escala a serem testados. Uma vez com o projeto definido, foram especificados e comprados os componentes necessários para a montagem dos sistemas. Além dos elementos de construção (material da base, topo, juntas, cilindros, válvulas e outros componentes), também foram especificados os elementos do sistema de processamento de dados. Este sistema conta com as placas de aquisição/processamento de dados e o programa *LabView*, ambos da *National Instruments*. Para alimentar o sistema também foi especificado um compressor de ar.

Construídas as plataformas, foram implementados modelos matemáticos no *MatLab*, para realizar simulações do comportamento do sistema e então, compará-los com os resultados obtidos nas bancadas em um teste experimental. Também foi usada a ferramenta de simulações do *SolidWorks*, o *CosmosMotion*, para realizar estas comparações.

SUMÁRIO

1	Introdução	7
1.1	Objetivos	7
1.2	Metodologia empregada	8
1.3	Organização do trabalho	9
2	Simuladores de movimentos	11
2.1	Introdução	11
2.2	Plataforma Stewart	12
2.3	Simulador Vertical (4 Post Rig)	15
3	Construção dos simuladores	19
3.1	Introdução	19
3.2	Projeto dos simuladores	19
3.2.1	Estudo inicial/Protótipo	19
3.2.2	Bancada de testes	21
3.2.3	Montagem mecânica	25
3.2.4	Circuito pneumático	27
3.2.5	Eletrônica e controle	30
3.3	Construção	33
3.4	Funcionamento	36
3.4.1	Plataforma Stewart	36
3.4.2	Simulador Vertical	39
4	Simulações em <i>MatLab</i>	44
4.1	Introdução	44
4.2	Modelos físicos e matemáticos	45
4.3	Rotina implementada	51
4.4	Resultado das simulações	56
5	Simulações em <i>CosmosMotion</i>	62
5.1	Introdução	62

5.2	Modelos usados	62
5.2.1	Plataforma Stewart	62
5.2.2	Simulador Vertical	63
5.3	Resultados das simulações	64
5.3.1	Plataforma Stewart	65
5.3.2	Simulador Vertical	66
6	Comparação e análise dos resultados	67
6.1	Introdução.....	67
6.2	Plataforma Stewart	67
6.3	Simulador Vertical	67
7	Conclusões	69
	Referências	72

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

AC	Corrente alternada
B	Matriz de amortecimento
b	Coefficiente de amortecimento, N.s/m; Distância no eixo y do centro de massa à suspensão, m
CM	Centro de massa
CC	Corrente contínua
DC	Corrente contínua
\vec{F}	Vetor de entrada de esforços, deslocamentos e velocidades de base
F	Força aplicada ao sistema, N
f	Frequência, Hz
g	Aceleração da gravidade, m ² /s
J	Momento de inércia de massa, kg.m ²
K	Matriz de rigidez
k	Coefficiente de rigidez, N/m
L	Distância do centro de massa à suspensão (modelo plano), m
l	Distância no eixo x do centro de massa à suspensão, m
M	Massa/matriz de massa da parte suspensa do veículo, kg; Momento aplicado ao sistema, N.m
m	massa da parte não suspensa do veículo, kg
R	Resistência elétrica, Ω
t	Tempo, s
V	Tensão elétrica, V
v	Velocidade linear, m/s
\vec{Z}	Vetor dos graus de liberdade
Z	Amplitude da excitação de base (perfil do terreno), m
z	Posição do centro de massa do chassi em relação ao solo, m

Símbolos Gregos

θ	Ângulo do chassi em relação ao solo, rad
ω	Velocidade angular do chassi, rad/s
ξ	Fator de amortecimento.

Subscritos

0	Excitação de base
1	Parte suspensa dianteira do veículo (modelo plano)

<i>2</i>	Parte suspensa traseira do veículo (modelo plano)
<i>3</i>	Parte não suspensa dianteira do veículo (modelo plano)
<i>4</i>	Parte não suspensa traseira do veículo (modelo plano)
<i>cc</i>	Em corrente contínua
<i>d</i>	dianteiro
<i>DD</i>	Dianteiro direito
<i>DE</i>	Dianteiro esquerdo
<i>p</i>	Parte não suspensa
<i>t</i>	traseiro
<i>TD</i>	Traseiro direito
<i>TE</i>	Traseiro esquerdo
<i>x</i>	Em relação ao eixo x
<i>y</i>	Em relação ao eixo y
<i>z</i>	Em relação ao eixo z

1 Introdução

1.1 OBJETIVOS

Com o objetivo de motivar os alunos está sendo desenvolvida para o Laboratório de Controle e Automação uma série de equipamentos para testes, avaliação e experimentação comuns em veículos reais, mas nesse caso em escala reduzida, empregando os mesmos conceitos básicos e dispositivos dos equivalentes em tamanho real. Logo, o objetivo deste trabalho é desenvolver equipamentos com atuação pneumática e controle digital a ser empregado para testes e demonstrações no Laboratório de Controle e Automação (LCA). Tal equipamento, o simulador, é um sistema mecatrônico que reproduz as principais atitudes e movimentos de um veículo, comandado pelos mesmos elementos do sistema real [8].

Dois simuladores em escala serão construídos, uma Plataforma Stewart e um Simulador Vertical. No primeiro simulador, sobre a plataforma propriamente dita é montada a cabine ou carroceria do veículo, dentro da qual o piloto (ou motorista) comanda o sistema e, deste modo, tem as mesmas sensações de estar controlando o veículo real, sem riscos ou temor de acidentes. O mecanismo articulado, com 6 graus de liberdade, é capaz de reproduzir os três ângulos de atitude - rolagem, arfagem e guinada, e os deslocamentos lineares - lateral, vertical e longitudinal, com limitações, porém com amplitude suficiente de modo a possibilitar as principais sensações associadas ao veículo real em condições normais de operação, e até em algumas situações consideradas de risco, como a perda de sustentação em aeronaves, ou o início da capotagem em veículos terrestres. No segundo simulador, o veículo (em escala, no caso) é posicionado sobre os atuadores do simulador. Através dos comandos externos, diferentes deslocamentos são aplicados em cada roda do veículo, possibilitando assim que possam ser observadas as respostas de cada elemento do sistema quando este recebe determinada excitação de base. Com isso, é possível testar a rigidez e o amortecimento do sistema de suspensão, avaliar a rigidez do chassi como um todo (aplicando torções) e verificar o comportamento do veículo quando submetido a certos perfis de terreno e quanto aos seus modos de vibração. Este mecanismo é capaz de reproduzir os dois ângulos de atitude

- rolagem e arfagem, e o deslocamento linear vertical no veículo, também com limitações, porém com amplitude suficiente para realizar os testes propostos [8].

1.2 METODOLOGIA EMPREGADA

Inicialmente foi estudado o sistema de monitoramento e controle de um conjunto válvula-atuador pneumático-transdutor já desenvolvido e disponível no laboratório e as arquiteturas comumente empregadas nos simuladores de movimento. Uma vez estudado este sistema, um novo conjunto de atuadores e válvulas foi adquirido para ser analisado, a fim de se conhecer suas capacidades de posicionamento e resposta a frequências diferentes. Neste sistema, as válvulas solenóides (eletromecânicas) eram comandadas por um micro-controlador. Ao micro-controlador associava-se um programa (*EasyC*) no qual as rotinas eram implementadas e transmitidas para a válvula através de interface apropriada. Este software tinha como base de programação a linguagem computacional C e depois de implementados vários tipos de programas, pôde-se aferir as propriedades do sistema pneumático em questão.

Em paralelo com o estudo do sistema pneumático, realizou-se o desenvolvimento do projeto da plataforma em um ambiente virtual de modelagem tridimensional. O programa usado foi o *SolidWorks*, um programa de desenho tridimensional. Com os resultados obtidos nos testes com o sistema pneumático, foram escolhidos e modelados os componentes necessários para se construir o equipamento. Usando a modelagem tridimensional oferecida pelo programa pôde-se construir o aparato em ambiente virtual e testá-lo, quanto a seus graus de liberdade e quanto aos limites de movimentação.

Em seguida foi estudado o programa *LabView* da *National Instruments* (NI) para desenvolver rotinas de controle e monitoramento do simulador, substituindo o *EasyC*, por se tratar de um programa mais completo e que atende melhor às especificações para o controle da plataforma de simulação. Para controlar a plataforma usando este programa, foram adquiridas placas de aquisição de dados da NI, que têm uma função similar a do micro-controlador anteriormente usado.

Junto a isto, foram construídas as plataformas projetadas (Figuras 1.2.1.a e 1.2.1.b). São feitas em aço, fenolite e outros materiais, como os plásticos usados nas juntas universais. As duas plataformas (a Stewart e o Simulador Vertical, com três graus de liberdade) se encontram no LCA.

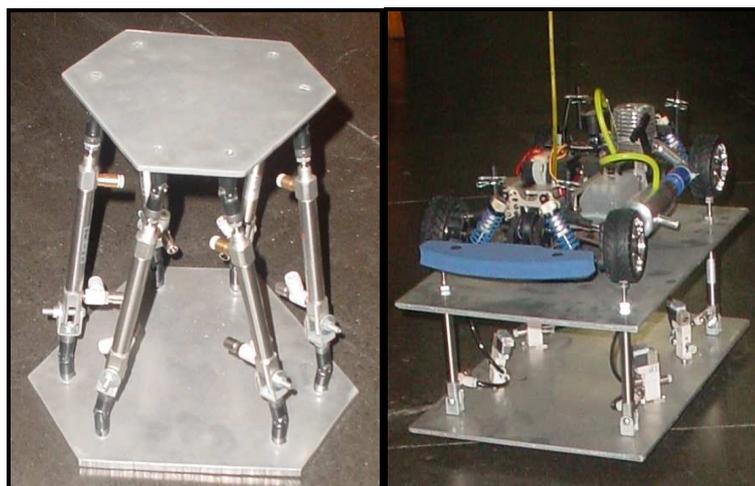


Figura 1. 1: a) Plataforma Stewart; b) Simulador Vertical.

Com os simuladores construídos, foram implementados modelos matemáticos do veículo que representam com certa realidade o sistema de suspensão, para poder simular o comportamento do veículo quando submetido às excitações de base que serão aplicadas no modelo real pelo Simulador Vertical. Este modelo matemático foi implementado no programa *MatLab*. Foram testados dois modelos, um que considera que os deslocamentos, velocidades e forças aplicadas nas duas rodas dianteiras são iguais, assim como no par de rodas traseiras, formando assim um modelo físico plano. O outro modelo, mais completo, já considera todas as rodas do veículo independentemente, formando assim um modelo físico tridimensional. Com estes modelos foram realizadas simulações (com o auxílio do *Simulink*, ferramenta do *MatLab*) nas quais as rodas eram excitadas e assim, foram obtidas algumas respostas do sistema.

Em seguida, usando os modelos feitos no *SolidWorks* e usando a ferramenta de simulação deste programa, o *Cosmos*, foram feitas simulações semelhantes, porém, não só no Simulador Vertical, como na Plataforma Stewart. Com os resultados das simulações, pretende-se fazer uma comparação com o que é observado no sistema real, ou seja, nos simuladores construídos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O desenvolvimento deste trabalho foi feito em seis partes principais, sendo cada uma destas partes um capítulo do trabalho.

No Capítulo 2 é dada uma breve introdução aos simuladores e sua importância na Engenharia. São mostrados detalhes históricos, de construção e detalhes sobre funcionamento básico dos dois tipos de simuladores analisados neste trabalho.

O Capítulo 3 explica em pormenores como foi dada a construção dos simuladores. É explicado como foi feito o projeto, quais foram seus requisitos e limitações. São mostrados os modelos em *SolidWorks* produzidos e detalhes da especificação de cada componente, desde os atuadores e válvulas até o compressor, passando pela escolha do material da estrutura das plataformas de simulação. Também é explicitada a forma de montagem dos componentes e o funcionamento do sistema, tanto da parte pneumática, quanto da parte eletrônica, mostrando a interação entre as partes.

No Capítulo 4 são mostrados os modelos físicos implementados (plano e tridimensional). Estes modelos foram feitos apenas para o Simulador Vertical. São feitas explicações sobre como se chegou a estes modelos e são mostrados os códigos e diagramas de blocos usados na simulação. Em seguida, são mostrados os resultados destas simulações.

O Capítulo 5 mostra os modelos usados na simulação em *CosmosMotion* e como foram aplicadas as excitações de base à estes modelos. Após isso, são mostrados os resultados das simulações, que foram feitas em ambos os simuladores.

No Capítulo 6 é feita uma comparação entre o resultado das simulações feitas usando os modelos matemáticos e os modelos tridimensionais.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho apresentado e também são feitas sugestões para trabalhos futuros que podem dar continuidade ou simplesmente usar as informações obtidas neste trabalho.

2 Simuladores de movimentos

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão descritos o funcionamento dos simuladores analisados neste trabalho, a Plataforma Stewart e o Simulador Vertical, além de serem introduzidos alguns conceitos sobre os sistemas pneumáticos que serão usados na construção dos simuladores.

Estes simuladores são sistemas mecatrônicos que reproduzem as principais atitudes e movimentos do veículo. Na Plataforma Stewart é montada a cabine ou carroceria do veículo, dentro da qual o piloto (controlador) comanda o sistema e, deste modo, tem as mesmas sensações de estar controlando o veículo real, sem riscos ou temor de acidentes. Esse mecanismo articulado, com 6 graus de liberdade, é capaz de reproduzir os três ângulos de atitude - rolagem, arfagem e guinada, e os deslocamentos lineares - lateral, vertical e longitudinal, com limitações, porém com amplitude suficiente de modo a possibilitar as principais sensações associadas ao veículo. No Simulador Vertical, o veículo (em escala, no caso) é posicionado sobre os atuadores do simulador. Através dos comandos aplicados a estes, diferentes deslocamentos são aplicados em cada roda do veículo, possibilitando assim que possam ser observadas as respostas de cada elemento do sistema quando este recebe determinada excitação de base. Este mecanismo possui 3 graus de liberdade, é capaz de reproduzir os dois ângulos de atitude - rolagem e guinada, e o deslocamento linear vertical.

Sistemas pneumáticos como o usado no desenvolvimento dos simuladores em questão, são constituídos pelos seguintes elementos:

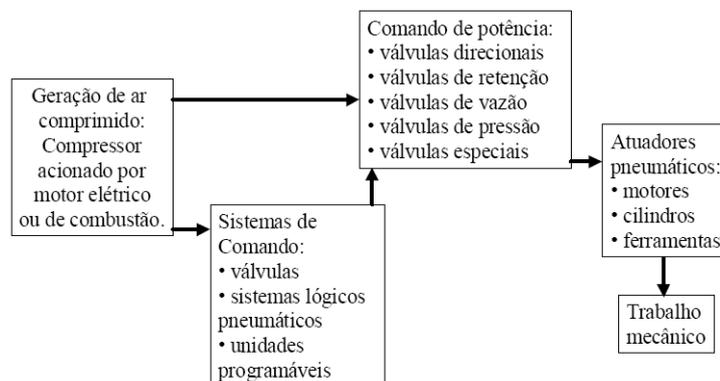


Figura 2.1: Elementos de um sistema de acionamento pneumático [10].

Os sistemas de comando são os responsáveis por controlar o atuador pneumático mediante a informação dos sensores. Pode consistir num microcomputador, por exemplo. Já o sistema de comando de potência converte os sinais recebidos do sistema de comando em sinais de níveis de energia para acionar os atuadores [10].

Entre as vantagens da utilização do ar comprimido, temos: facilidade de obtenção (volume “ilimitado”); não apresenta riscos de faísca em atmosfera explosiva; fácil armazenamento; não contamina o ambiente (sistema limpo e atóxico); não necessita de linhas de retorno (escape para a atmosfera), ao contrário de sistemas elétricos e hidráulicos; acionamentos podem ser sobrecarregados até a parada [10].

No entanto, o ar apresenta vapor de água (umidade). Esse vapor pode se condensar ao longo da linha pneumática dependendo das condições de pressão e temperatura ao longo da linha. Se não houver um sistema para retirar a água, ela pode se acumular causando corrosão das tubulações. O ar apresenta também uma baixa viscosidade. Um fluido que tem baixa viscosidade pode escoar por pequenos orifícios e, portanto a chance de ocorrer vazamentos é muito grande. Assim, vazamentos de ar em linhas pneumáticas são muito comuns. Os equipamentos pneumáticos (principalmente as válvulas) são constituídos de mecanismos muito delicados e sensíveis e para que possam funcionar de modo confiável, com bom rendimento, é necessário assegurar determinadas exigências de qualidade do ar comprimido, entre elas: pressão, vazão, teor de água, teor de partículas sólidas e teor de óleo [10].

As grandezas de pressão e vazão estão relacionadas diretamente com a força e velocidade, respectivamente, do atuador pneumático. Cada componente pneumático tem sua especificação própria de pressão e vazão de operação. Para atender a essas especificações é necessária suficiente vazão no compressor, correta pressão na rede e tubulação de distribuição corretamente dimensionada em função da vazão. Já água, óleo e impurezas têm grande influência sobre a durabilidade e confiabilidade de componentes pneumáticos. O óleo em particular é usado para lubrificar os mecanismos dos sistemas pneumáticos. Dependendo da aplicação as exigências do ar com relação à água, óleo e impurezas são diferentes [10].

2.2 PLATAFORMA STEWART

O projeto da Plataforma Stewart consiste em um robô paralelo controlado eletronicamente através de servo-válvulas eletro-pneumáticas. Esta plataforma foi

originalmente desenvolvida em 1965 como um simulador de vôo. Desde então, uma vasta variedade de aplicações se utilizam deste invento. Isto porque produz uma melhor atuação, maior rigidez, maior razão carga-peso e uma distribuição de carga mais uniforme. Basicamente, ela é usada no controle de posicionamento e é constituída de uma base fixa acoplada em seis pontos a um platô móvel na parte superior através de cilindros pneumáticos, ou seja, é uma estrutura articulada acionada por seis atuadores lineares.

Estes robôs paralelos são definidos como um dispositivo multifuncional e reprogramável projetado para mover e manipular materiais, partes ou ferramentas através de movimentos programados para a realização de uma variedade de tarefas especificadas. Um robô paralelo é composto por uma cadeia cinemática fechada, na qual cadeias seriais separadas se conectam a uma plataforma fixa e, em sua extremidade oposta, se conectam a uma plataforma móvel. Também são chamados de manipuladores. Este tipo de manipulador apresenta grandes vantagens quando comparado aos manipuladores seriais, como melhor estabilidade e precisão, capacidade de manipular cargas relativamente grandes, altas velocidades e acelerações e baixa força de atuação.

O desenho dos manipuladores paralelos se remonta há várias décadas atrás, em 1962, quando Gough e Witehall desenharam um sistema paralelo para ser usado em uma máquina de provas universais. Stewart em 1965 projetou um manipulador de plataforma para ser usado em simuladores de vôo. Em 1983 Hunt realizou um estudo da estrutura cinemática dos manipuladores paralelos. Desde então vão se desenrolando inúmeros estudos por diversos pesquisadores. Entre os mais recentes se destacam J.P. Merlet e L.W. Tsai. A Figura 2.2a abaixo mostra o primeiro simulador de vôo com uma estrutura de seis graus de liberdade e a Figura 2.2b mostra um robô paralelo empregado na montagem de peças, também com seis graus de liberdade [7].

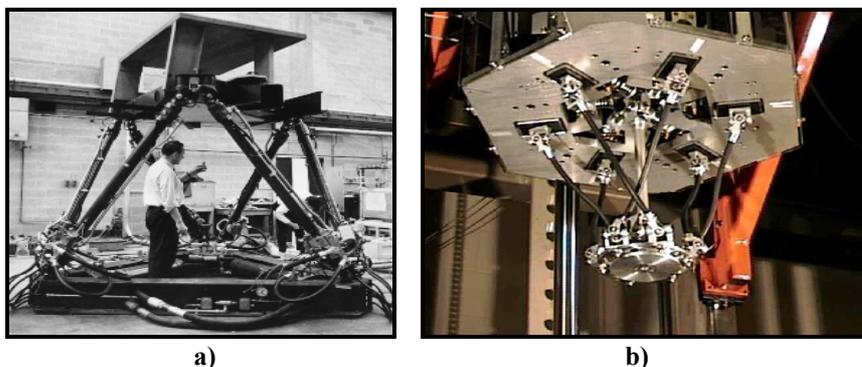


Figura 2.2: Exemplos de robôs paralelos baseados na plataforma de Stewart. a) Simulador de vôo; b) Robô montador.

Existem outras configurações de plataforma, como a Delta, com três graus de liberdade. Foi inventada por Clavel em 1988 e é usada em robôs como os mostrados na Figura 2.3.

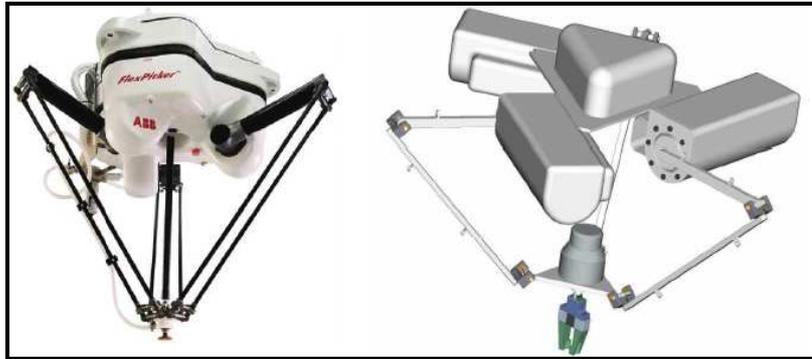


Figura 2.3: Robôs paralelos de quatro graus de liberdade, baseados na plataforma Delta.

Um limitante importante que existe nestes manipuladores (tipo Delta) é seu reduzido espaço de trabalho, sendo este uma das tendências nos rumos das pesquisas futuras destes robôs [7].

Os manipuladores paralelos podem ser classificados como planares, esféricos e espaciais, de acordo com as características de movimento. Na Figura 2.4 pode-se distinguir esta classificação [7].

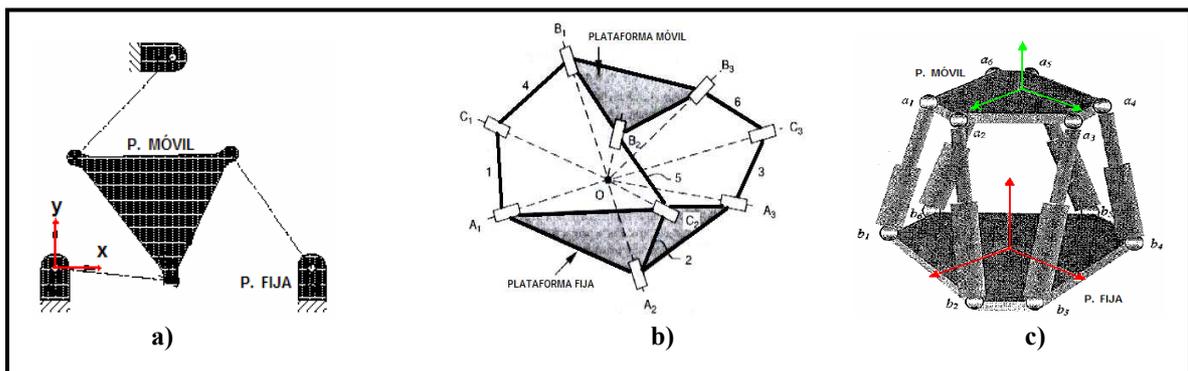


Figura 2.4: Classificação de robôs paralelos de acordo com seus movimentos: a) planar; b) esférico; c) espacial [7].

Também podem se classificar de acordo com suas características estruturais como simétricos e assimétricos. Um manipulador paralelo é chamado de simétrico se segue as seguintes condições: O número de encadeamentos deve ser igual ao número de graus de liberdade da plataforma móvel; o tipo e número das articulações em todos os encadeamentos

devem estar fixos em um modelo idêntico; o número e a localização das articulações e dos atuadores devem ser os mesmos. Quando as condições mencionadas não se cumprem, o manipulador é chamado assimétrico. Pode-se observar então que nos robôs paralelos simétricos o número de encadeamentos, m , é igual ao número de graus de liberdade F , cujo qual é igual ao número total de cadeias cinemáticas, L . Isto pode se expressar como $m = F = L$ [6].

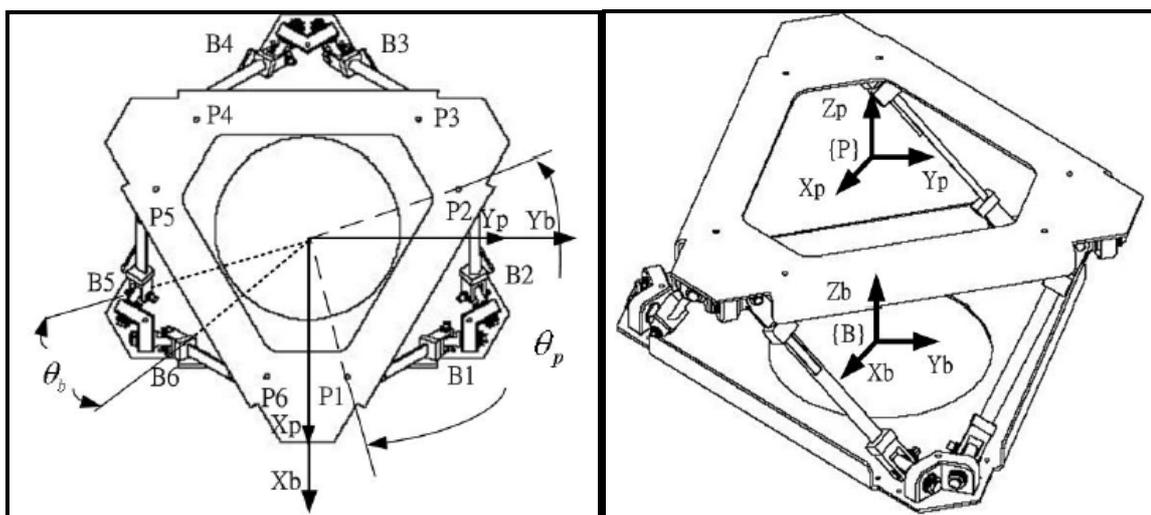


Figura 2.5: Posição e orientação das placas na Plataforma Stewart [6].

2.3 SIMULADOR VERTICAL (4-POST RIG) [3]

Um ramo da indústria, especificamente a relacionada com os veículos terrestres, tem sido na atualidade foco de grandes desenvolvimentos e estudos com diversos fins, quer seja para fornecer veículos de corridas muito velozes e sofisticados, ou para brindar ao usuário de todos os dias com conforto e segurança no ato de conduzir ou ainda para permitir o transporte de mercadorias e outros bens que necessitam ser movimentados de um lugar a outro.

É pensando nestes fatos que se decidiu desenvolver um Simulador de Movimentos para Veículos Terrestres (Figura 2.6). Um simulador é um mecanismo articulado, controlado automaticamente, normalmente composto por um conjunto de atuadores hidráulicos com o objetivo de reproduzir em laboratório as imperfeições das estradas pelas quais circulam diariamente os veículos, para desta maneira testá-los em condições semelhantes às encontradas em uma estrada real. Mas é bem sabido que realizar experimentos e ensaios com protótipos em tamanho real demanda um elevado custo e espaço físico, assim como o

emprego de outros equipamentos necessários para conseguir manipular os protótipos, então se torna muito mais fácil, econômico e simples trabalhar com modelos semelhantes ao protótipo, porém em escala reduzida. Assim neste trabalho será analisado o projeto de um Simulador Vertical em escala.

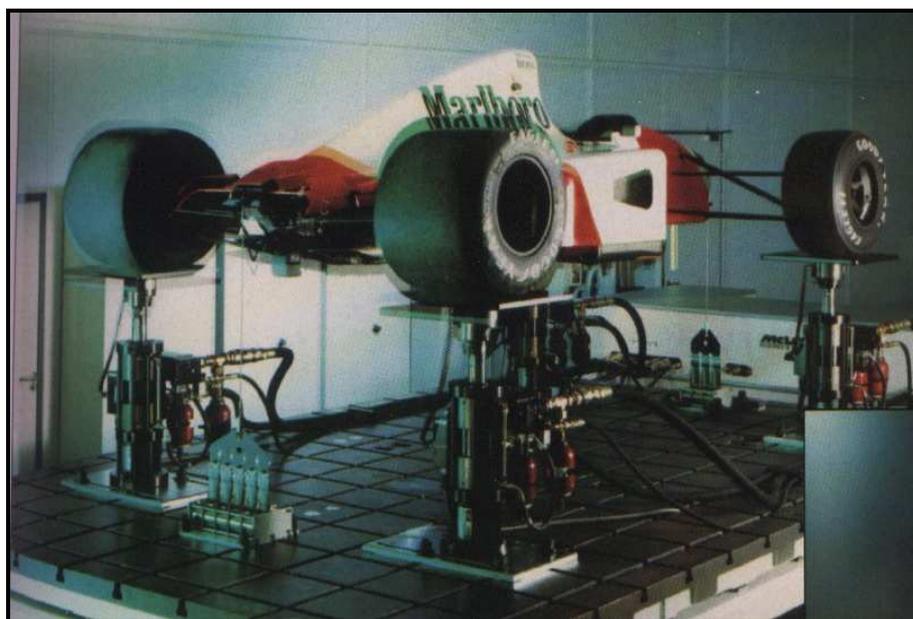


Figura 2.6: Simulador Vertical.

O simulador de movimentos (Figura 2.7) é um sistema automático, composto por quatro atuadores independentes entre si com um sistema de controle, mediante o qual se poderá simular com muita precisão determinados perfis de estradas, tal qual como os que ocorrem com os veículos no seu emprego diário, reproduzindo em laboratório a sua dinâmica vertical com 3 graus de liberdade: elevação, arfagem e rolagem.

Neste simulador se consegue representar o deslocamento de um automóvel em uma estrada de todas as maneiras verticais possíveis, e assim predizer como o mesmo irá trafegar em diferentes velocidades, considerando a irregularidade da estrada, de modo que o sistema de suspensão perceba diferentes excitações e responda a elas, possibilitando analisar e estudar as suas respostas.

O sistema empregado para a atuação é basicamente composto por um reservatório para o fluido hidráulico, uma bomba para dar ao fluido deslocamento volumétrico com uma determinada pressão e vazão, uma servoválvula que será a responsável por controlar o deslocamento do sistema, e finalmente os atuadores, que são os elementos que transmitirão o movimento vertical (excitação) até o sistema de suspensão do veículo a ser testado.

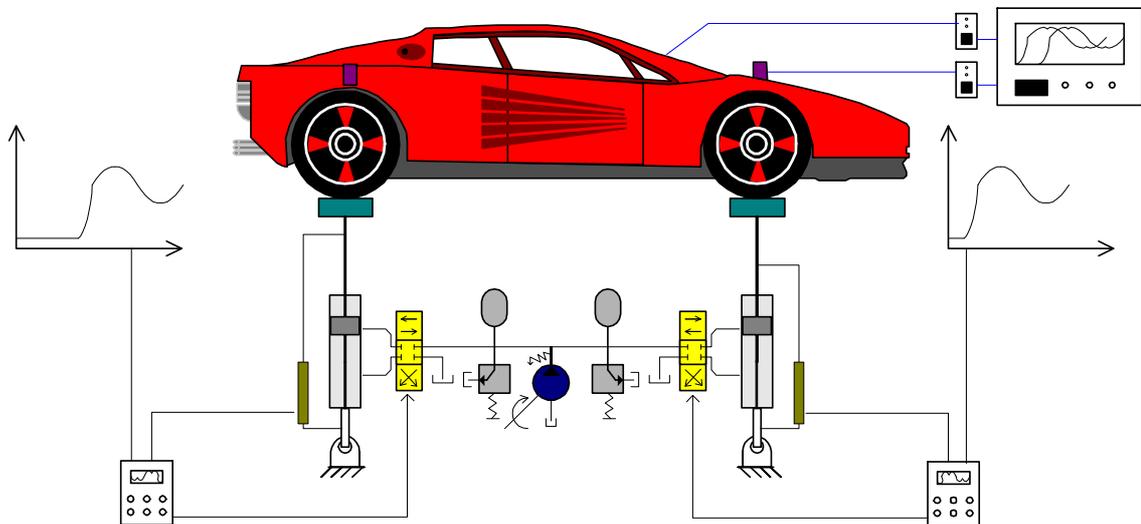


Figura 2.7: Simulador de movimentos.

O simulador poderá excitar o veículo de diferentes modos: elevação, arfagem, rolagem e torção, um modo por vez. A arfagem (*pitch*) é o movimento em subida ou descida da traseira do carro, enquanto que a elevação (*heave* ou *bounce*) (Figura 2.8b) é igual à redução da altura de deslocamento em ambos os extremos do carro. Torção (*warp*) é uma deformação como uma rolagem (*roll*) oblíqua.

No modo elevação o movimento dos quatro atuadores é idêntico, enquanto que na arfagem os atuadores dianteiros e traseiros se movimentam fora de fase, isto é os dianteiros estão acima ao mesmo tempo que os traseiros estão embaixo, e vice-versa (Figura 2.8a). A rolagem é obtida de forma semelhante, mas com os atuadores de cada lado defasados. No modo de torção o atuador dianteiro esquerdo e o traseiro direito estão acima enquanto que os outros dois estão embaixo e vice-versa. O mesmo controle de forma de onda é usado para quando se tem elevação e quando não se tem elevação; nestes últimos casos os atuadores são simplesmente impulsionados sem sincronização.

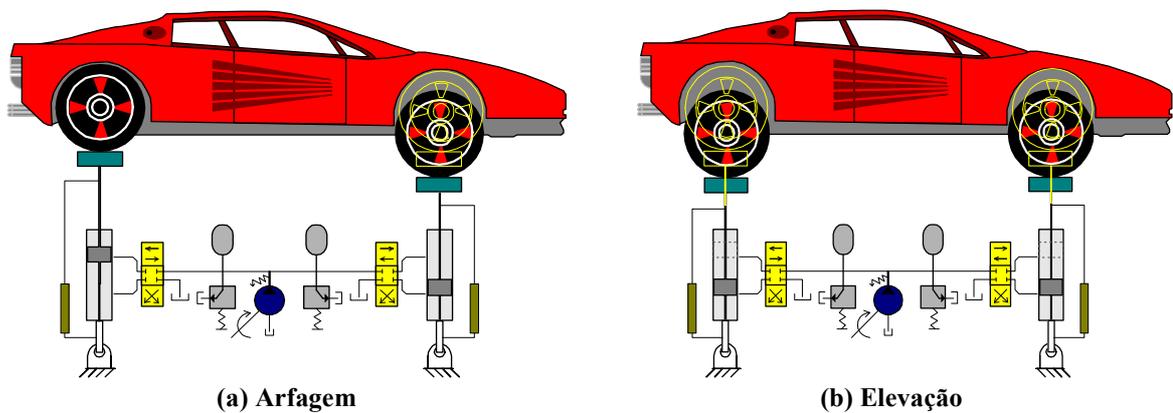


Figura 2.8: Movimentos do Simulador

Normalmente, um simples teste em qualquer um dos modos pode demorar alguns segundos (pode ser em torno de 30 segundos). Durante este tempo o carro é excitado numa faixa de frequências de 1,0 Hz até 40 Hz (0,5 – 20 no caso de um carro de corrida) com a amplitude de deslocamento se reduzindo conforme a frequência de entrada vai se incrementando, mas a velocidade do atuador permanece constante. Devem ser tomados cuidados para garantir que o deslocamento máximo não provoque a saída do pneu fora de sua plataforma de apoio.

Em cada modo o veículo será testado através de uma faixa de frequência e amplitude. O procedimento continuará até que as características de medida sejam consideradas apropriadas para o veículo em questão. Geralmente uma seção de testes deve começar no modo elevação cujo propósito é conseguir posicionar (centralizar) o carro corretamente na plataforma neste modo, antes de explorar os outros.

O acoplamento cruzado entre modos é uma consideração importante, por exemplo, não deve haver nenhuma arfagem, rolagem ou torção quando o simulador está rodando em modo elevação.

A plataforma de apoio carrega uma célula de carga para medição, na qual se mostra a força de contato instantâneo do pneu quando o veículo é excitado. Considerando que o Simulador reproduz os efeitos de passar sobre ondulações e de transferir o peso, estas leituras são muito significativas para o ajuste do desempenho do veículo. Resultados comparáveis a estes dificilmente seriam obtidos com o veículo trafegando normalmente sobre a pista de rolamento.

3 Construção dos simuladores

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão mostrados todos os passos do projeto inicial dos simuladores, desde as considerações iniciais com relação à escala usada até o desenho em *SolidWorks*. Serão apresentados os métodos para a especificação dos componentes. Será descrito também como foi o procedimento de montagem e os detalhes de acabamento, como também o funcionamento da parte elétrica, dos programas associados e do conjunto como um todo, incluindo seus sistemas de alimentação.

3.2 PROJETO DOS SIMULADORES

3.2.1 Estudo inicial/Protótipo

Inicialmente foi estudado o sistema de monitoramento e controle de um conjunto válvula-atuador pneumático-transdutor já desenvolvido e disponível no laboratório (Figura 3.1) e as arquiteturas comumente empregadas nos simuladores de movimento [8].



Figura 3.1: Conjunto válvula-atuador pneumático-transdutor já desenvolvido.

Com base nos atuadores deste conjunto, foi realizado um projeto para a plataforma utilizando o software *SolidWorks*, um programa de modelagem tridimensional. Com esta ferramenta pôde-se observar o comportamento geométrico da plataforma para diferentes configurações [8].

Em seguida um protótipo foi construído. O topo, a base e a parte interna de cada atuador foram feitos em madeira. A parte externa dos atuadores foi feita com tubos de PVC e as juntas usadas são de plástico com elementos de ligação (pinos das juntas) metálicos. Também foram usados parafusos com porcas borboletas para formar o elemento de fixação de cada atuador no protótipo, que se encontra no Laboratório de Controle e Automação (Figura 3.2) [8].



Figura 3.2: Protótipo virtual e protótipo da Plataforma Stewart construído.

Também foi feito um projeto da Plataforma Stewart utilizando o conjunto válvula-atuador pneumático-transdutor anteriormente citado. A Figura 3.3 mostra o desenho tridimensional do projeto [8].

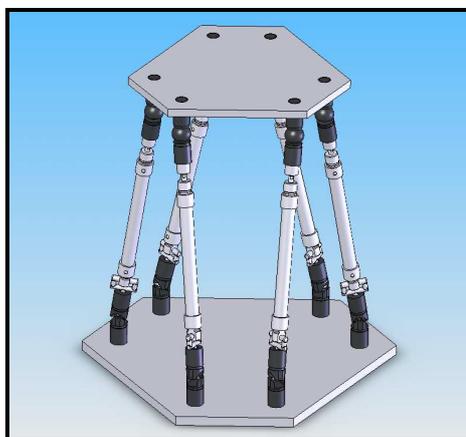


Figura 3.3: Modelo de Plataforma Stewart.

3.2.2 Bancada de testes

Uma vez estudado o sistema composto por válvula-atuador, um novo conjunto de atuadores e válvulas foi adquirido para ser estudado, a fim de se conhecer suas capacidades de posicionamento e resposta a frequências diferentes. O conjunto adquirido é semelhante ao mostrado na Figura 3.4. Os critérios para a escolha destes elementos foram: ter dimensões compatíveis com as dos veículos em escala que deverão ser acoplados à Plataforma Stewart e ao Simulador Vertical a ser construída e ter capacidade de aplicar forças suficientes para elevar os corpos colocados nos simuladores com acelerações suficientes para realizar todos os testes propostos. Assim, construiu-se uma bancada para testar e conhecer melhor este sistema que está disponível no laboratório (Figura 3.5) [8].

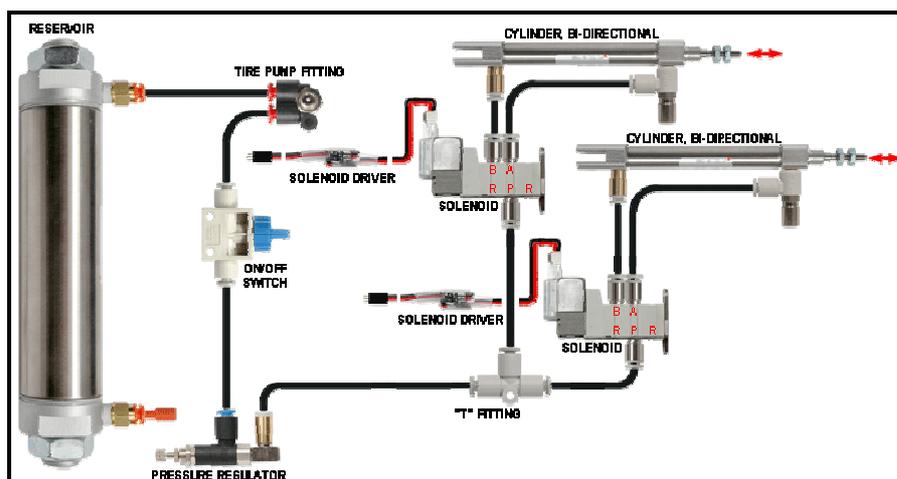


Figura 3.4: Conjunto adquirido [9].

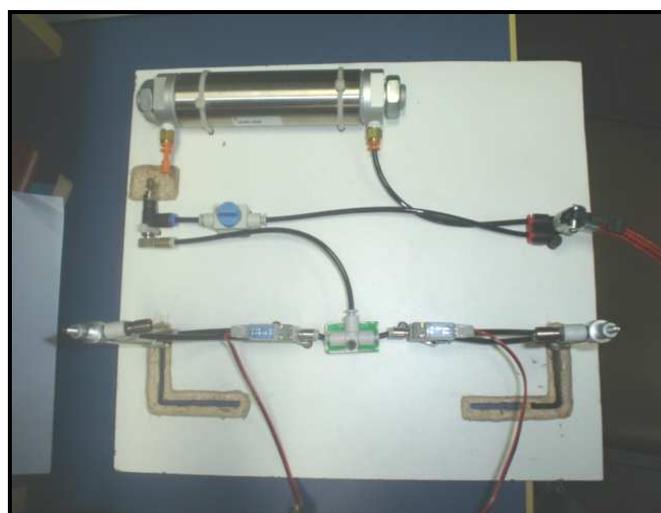


Figura 3.5: Bancada de testes construída [8].

Nos atuadores (produzidos pela *SMC Pneumáticos do Brasil*), a pressão máxima de trabalho é 100 psi, com diâmetro do êmbolo de 10 mm, curso de 50 mm e força máxima aplicável de 54 N (5,51 kgf). Este valor pode mudar com a pressão interna que é aplicada nos cilindros. Assim, temos que, sujeitos a uma carga axial, os seis cilindros em paralelo, no caso da Plataforma Stewart, são capazes de suportar em determinada posição vertical, uma carga máxima de 324 N (33,0 kgf). No caso dos quatro cilindros em paralelo do Simulador Vertical, esta carga é de 216 N (22,0 kgf). Ou seja, como estimativa inicial, estas capacidades são suficientes para elevar qualquer veículo em escala a ser usado, com massa de até 5 kg com acelerações de até 4 g.

Porém, para saber as acelerações máximas que podem ser aplicadas, cada caso deve ser analisado separadamente. Estes números apresentam apenas uma ordem de grandeza. No caso do Simulador Vertical, estes números podem ser boas aproximações, uma vez que os carregamentos são sempre axiais em cada roda, mas, além do fato de que a pressão aplicada pode não ser a máxima suportada pelo cilindro, os efeitos de amortecimento e de rigidez do sistema de suspensão, podem mudar bruscamente esse valor de aceleração máxima aplicável ao sistema. No caso da Plataforma Stewart, as variações são ainda maiores, uma vez que ela dificilmente trabalhará com apenas esforços axiais nos cilindros. Aliás, isto só ocorrerá se as dimensões do topo e da base forem as mesmas e os cilindros estiverem todos alinhados, o que raramente é usado, uma vez que isso limita muito os ângulos e deslocamentos nos eixos longitudinais máximos da Plataforma.

Outro fator importante é o fato de que o veículo em cima da Plataforma pode se deslocar de modo que seu centro de massa fique desalinhado em relação à linha de centro (vertical) da Plataforma. Na verdade, na maioria dos testes, isto acontece em quase todos os instantes. Nestas posições, além de realizar os esforços para elevação do corpo, ainda devem ser aplicados momentos para equilibrar o corpo em determinada posição. Dependendo dos limites nos deslocamentos longitudinais, os valores de força aplicadas pelo cilindro para realizar este equilíbrio e também a aceleração do corpo em determinada direção, podem variar muito. Com as simulações e os testes experimentais serão obtidos melhores valores para os limites dinâmicos dos simuladores.

A Figura 3.6 descreve esse tipo de atuador juntamente com o seu símbolo e características construtivas. A atuação é feita por ar comprimido nos dois sentidos. Entre as suas características temos: atuação de força nos dois sentidos, porém com força de avanço

maior do que a de retorno; não permite cargas radiais na haste. O curso não pode ser muito grande, pois surgem problemas de flambagem [10].

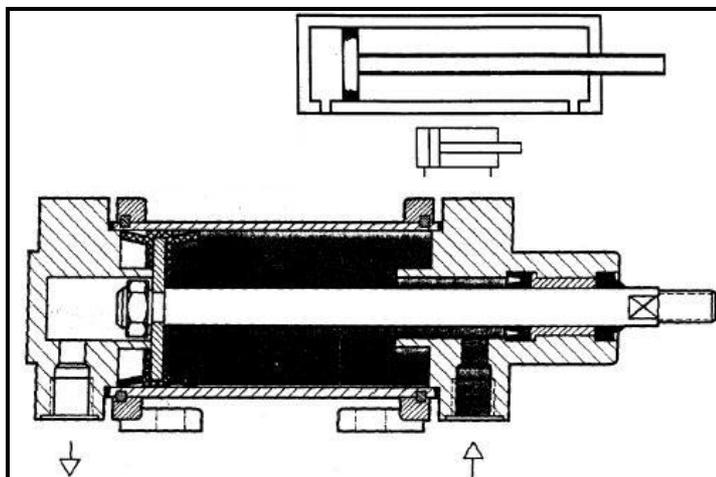


Figura 3.6: Cilindro de dupla ação.

A válvula reguladora de pressão tem a função de manter constante a pressão no equipamento. Ela somente funciona quando a pressão a ser regulada (pressão secundária) for inferior que a pressão de alimentação da rede (pressão primária). Assim essa válvula pode reduzir a pressão, mas jamais aumentá-la. A Figura 3.7 descreve uma válvula reguladora juntamente com o seu símbolo [10].

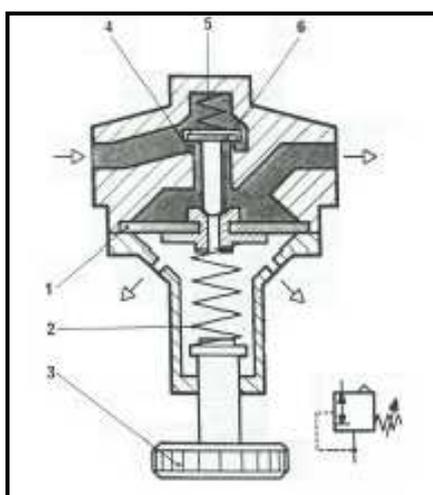


Figura 3.7: Válvula reguladora de pressão.

O seu funcionamento ocorre da seguinte forma. Se a pressão secundária diminuir em relação a um valor especificado a mola 2 empurra o êmbolo 6 que abre a comunicação com a pressão primária. Se a pressão secundária aumenta, em relação a um valor especificado

(por exemplo, devido a um excesso de carga no atuador) então a membrana 1 é atuada pressionando a mola 2 e o êmbolo 6 fecha a comunicação até que a pressão secundária diminua. Se a pressão secundária aumentar demais, então além de ocorrer a situação anterior, a membrana 1 se separa do êmbolo 6, abrindo a comunicação com os furos de exaustão, ocorrendo o escape de ar, o que reduz a pressão secundária. O parafuso 3 permite regular a rigidez da mola 2 e, portanto, a pressão secundária [10].

As válvulas direcionais (solenóides) têm a função de comandar a partida, a parada e o sentido de movimento do atuador. Neste sistema (da bancada de testes), as válvulas solenóides (eletromecânicas) são comandadas por um micro-controlador, uma placa onde a rotina de programação é praticada. A esta placa associa-se um programa da *VEX* (o software *EasyC*) no qual os programas são implementados, compilados e “baixados” para a placa, que por sua vez, transmite as informações diretamente para a válvula através de interface apropriada. O sistema é alimentado por um compressor (uma adaptação feita com um compressor de geladeira – Figura 3.8) que o alimenta com uma pressão que oscilava em torno de 60 psi [8].



Figura 3.8: Compressor inicialmente usado para alimentar a bancada de testes do sistema válvula-atuador.

Este software (*EasyC*) tinha como base de programação a linguagem computacional C e, depois de implementados vários tipos de programas, pôde-se aferir as propriedades do sistema pneumático em questão. Primeiramente, foi desenvolvido um programa para simplesmente testar o funcionamento da válvula [8].

Vários tipos de testes foram realizados. Um deles foi o teste de resposta a diversas frequências, variando de 1 a 60 Hz. Com estes testes pôde-se observar a variação máxima de amplitude do atuador com o aumento da frequência, para assim poder projetar suas condições ideais de uso. Outro programa realizado possibilitou o controle dos atuadores através de um controle remoto, também da *VEX* (Figura 3.9). Um último programa compilado com esta ferramenta utiliza os vários canais do controle remoto para fazer com que os atuadores elaborem diferentes funções [8].

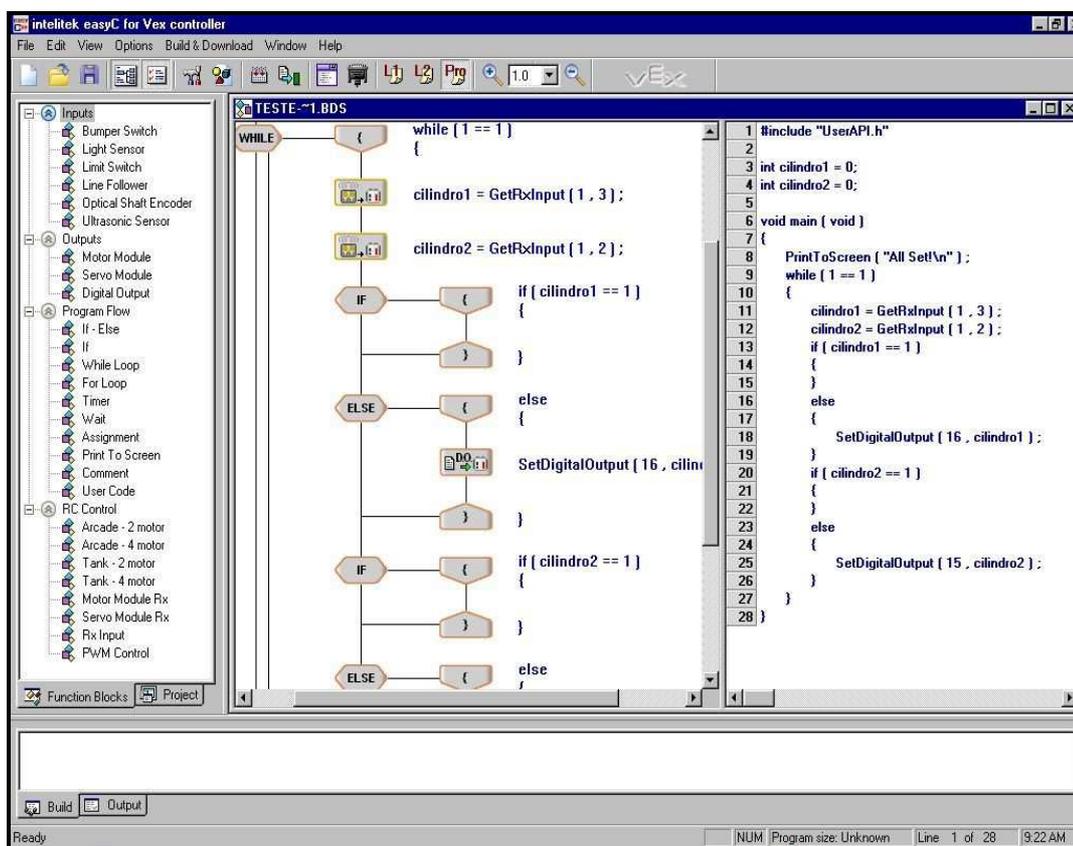


Figura 3.9: Programa para controle da válvula através de um controle remoto *VEX* [8].

3.2.3 Montagem mecânica

Em paralelo com o estudo do sistema pneumático, realizou-se o desenvolvimento do projeto da plataforma em um ambiente virtual de modelagem tridimensional. O software utilizado foi o *SolidWorks*. Com os resultados obtidos nos testes com o sistema pneumático, foram escolhidos e modelados os componentes necessários para se construir o equipamento usando a modelagem tridimensional. Usando esta modelagem tridimensional pôde-se

construir o aparato em ambiente virtual e testá-lo, quanto a seus graus de liberdade e quanto aos limites de sua geometria (Figuras 3.10 e 3.11).

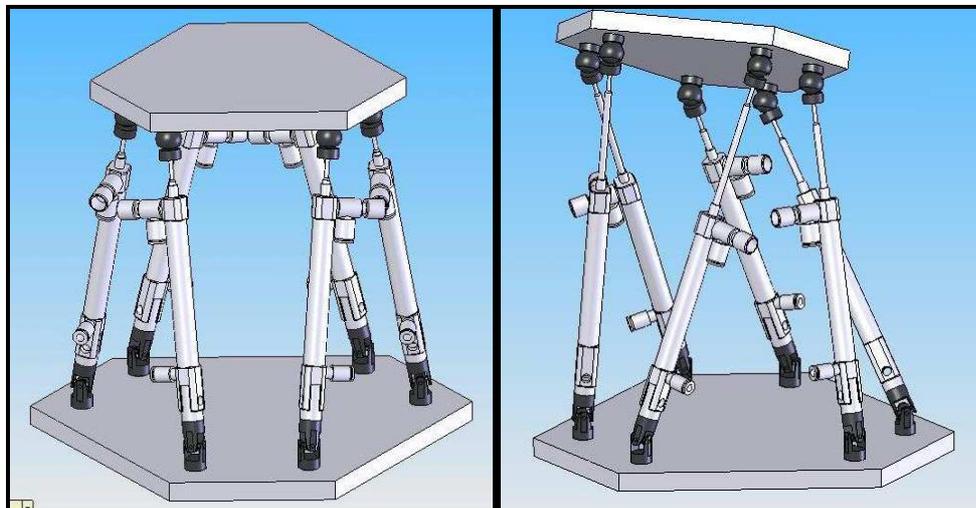


Figura 3.10: Plataforma Stewart usando os atuadores testados.

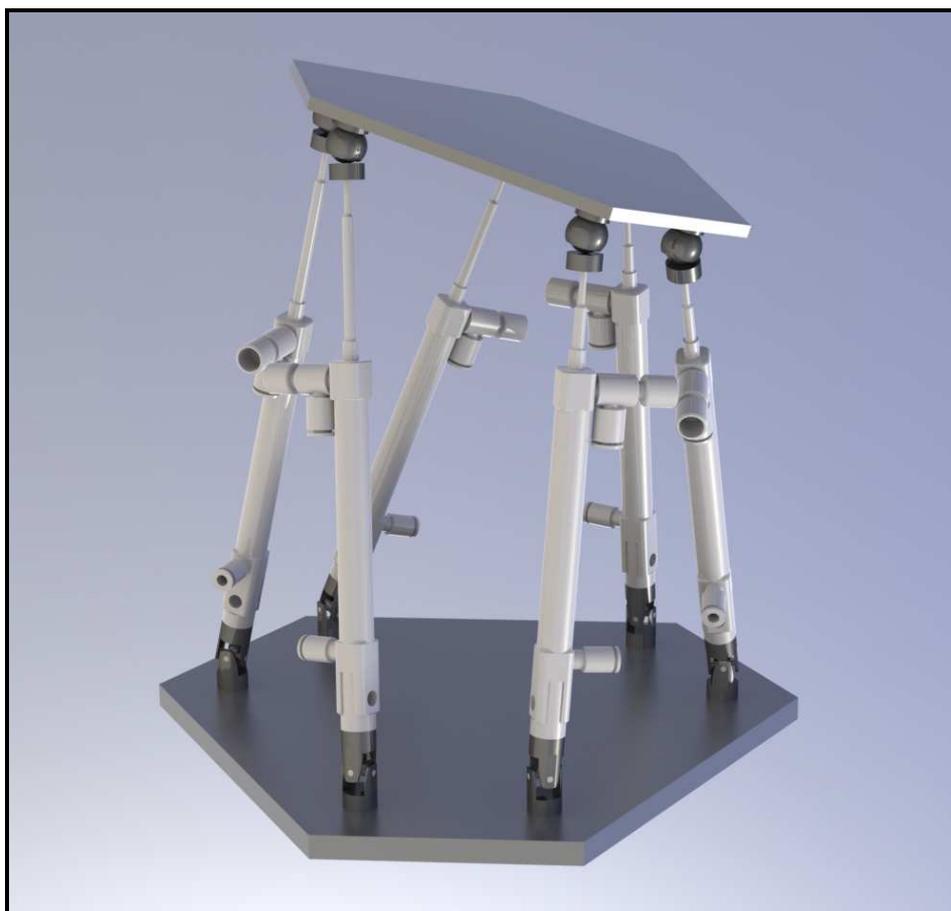


Figura 3.11: Modelo tridimensional da Plataforma Stewart.

Para realizar este modelo, cada peça precisou ser modelada separadamente, tais como o topo, a base, cada uma das partes móveis das juntas universais e esféricas, os parafusos e outras peças de acoplamento, o corpo do atuador e seu cilindro.

Assim, seguiu-se também o projeto do Simulador Vertical para sistemas de suspensão veicular em escala. Este simulador vertical também segue a linha dos robôs paralelos, porém, este consiste em quatro atuadores com apenas um grau de liberdade posicionados de forma a se conectar com as rodas do veículo a ser testado. Cada atuador fica preso a uma roda e, através de válvulas eletro-mecânicas, suas posições são controladas, possibilitando assim a simulação de diversos tipos de terrenos e situações num veículo em escala (Figuras 3.12).

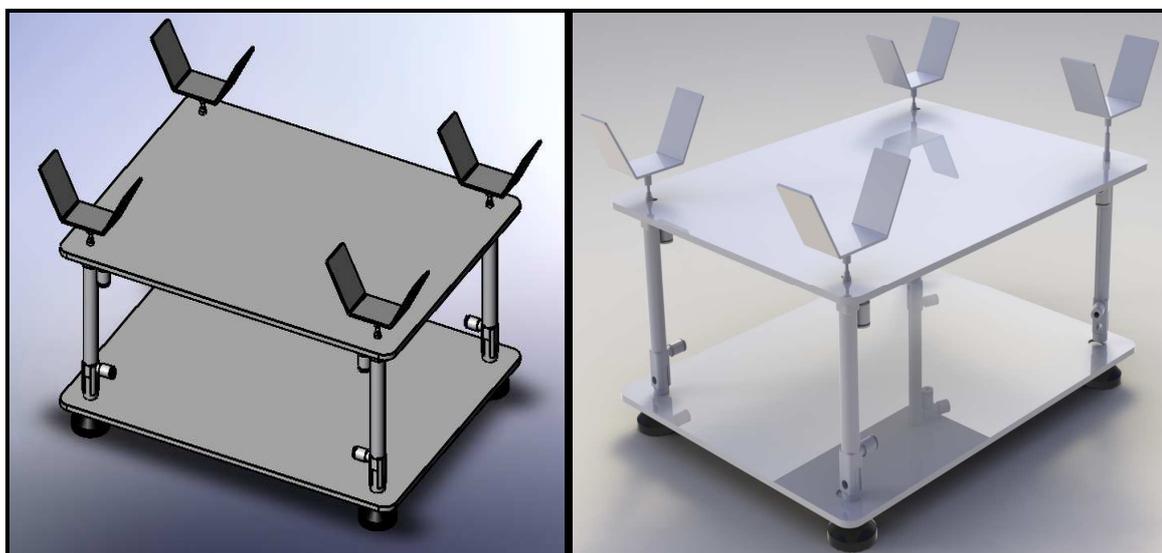


Figura 3.12: Simulador Vertical usando os atuadores testados.

3.2.4 Circuito pneumático

Com as válvulas usadas na bancada de teste, do tipo 3/2 vias (3 vias e 2 posições) não havia a possibilidade de manter a haste do pistão parada em determinada posição intermediária. Isto só seria possível, usando este tipo de válvula, se fossem usadas duas válvulas por cilindro em uma montagem especial. Por esta razão, para estas plataformas, foram adquiridas válvulas solenóides 5/3 vias (5 vias e 3 posições; Figura 3.13 e 3.14) com posição central bloqueada para melhorar seu controle e posicionamento. Assim, dando os pulsos de maneira correta, pode-se parar a haste do pistão em posições intermediárias. Por exemplo, Um comando aplicado a um dos lados da válvula, abre a via que libera a passagem

de ar pressurizado do compressor par um dos lados do pistão, fazendo se mover. Se, no meio do percurso, a passagem para o outro lado for acionada, os dois lados do pistão estarão pressurizados e assim ele ficará na posição desejada.

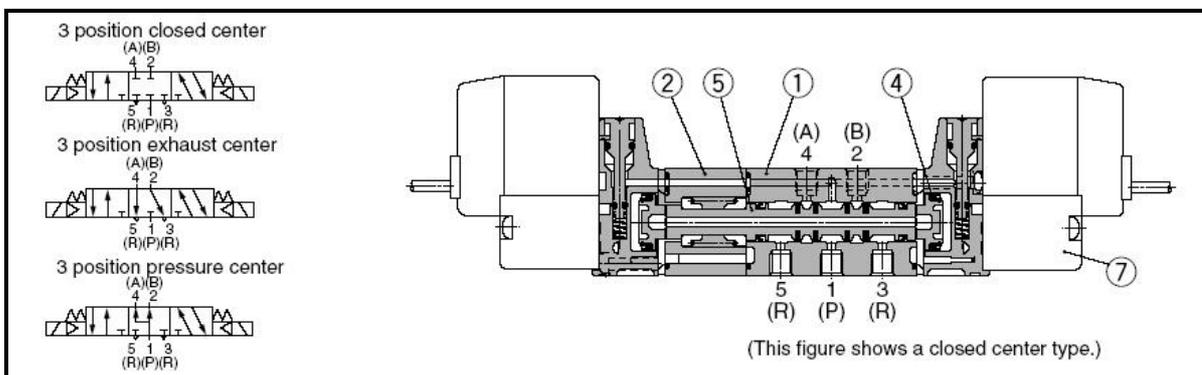


Figura 3.13: Válvula 5/3 vias com centro fechado.

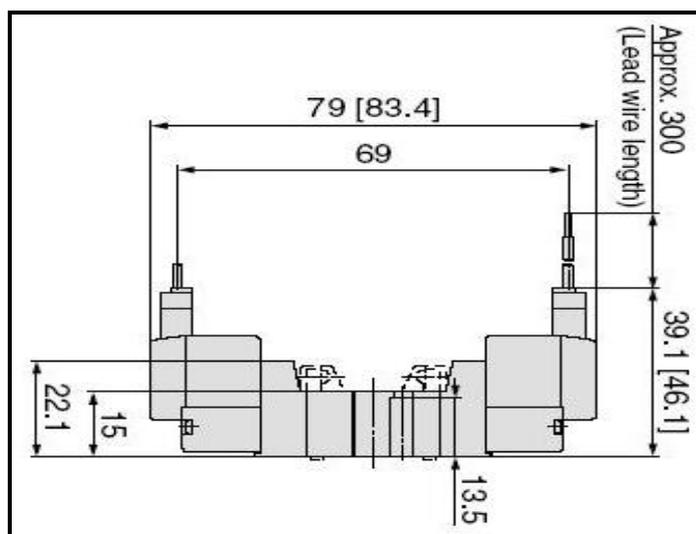


Figura 3.14: Válvula 5/3 vias - dimensões.

Os circuitos pneumáticos da Plataforma Stewart e do Simulador Vertical, ficaram como mostrados nas Figuras 3.15 e 3.16. A numeração dos componentes segue o seguinte padrão: os elementos atuadores recebem seus números na seqüência 1.0, 2.0, *et cetera* [10]. Para as válvulas, o primeiro número está relacionado à qual elemento de trabalho elas influem. No caso, como são válvulas de comando, que acionam diretamente o pistão, recebem o número 1 à direita do ponto. Para os elementos de regulagem, o número à direita do ponto é um número par maior que zero. Para os elementos de alimentação o primeiro número é 0 e o número depois do ponto corresponde à seqüência com que eles aparecem.

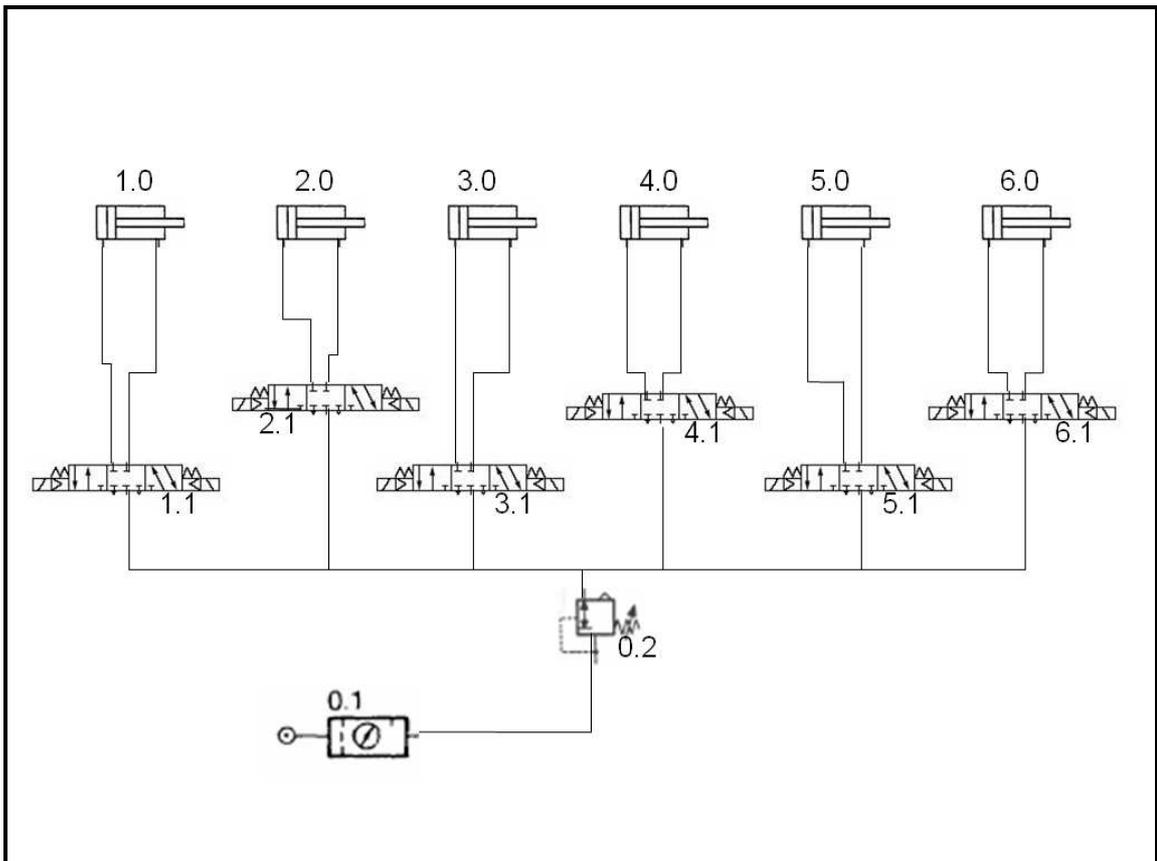


Figura 3.15: Circuito pneumático da Plataforma Stewart [8].

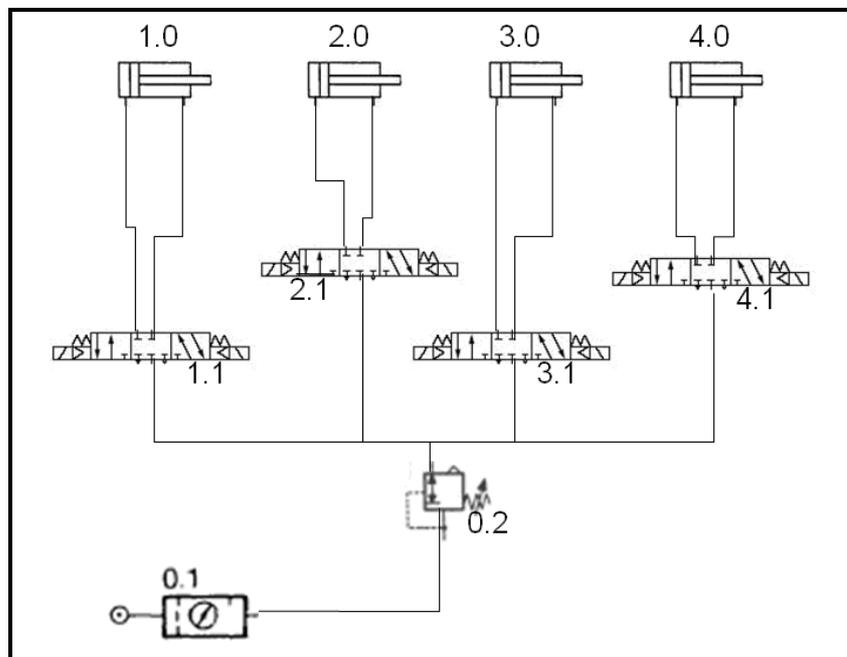


Figura 3.16: Circuito pneumático do Simulador Vertical [8].

3.2.5 Eletrônica e controle

Em seguida foi estudado o programa *LabView* para desenvolver rotinas de controle e monitoramento do simulador, substituindo o *EasyC*, usado na bancada de testes, por se tratar de um programa mais completo e que atende melhor às especificações para o controle das plataformas de simulação. Para controlar a plataforma usando este programa, foram adquiridas placas de aquisição de dados da NI (*National Instruments*), que têm uma função similar a do micro-controlador anteriormente usado. Neste sistema, dois tipos de placas foram usados: placas de recepção (aquisição) e de emissão de dados.

Como a válvula usada funciona apenas com entradas digitais, ou seja, recebe apenas comandos de aberto ou fechado em cada uma de suas vias para controlar a posição do pistão, a placa de emissão (NI 9476; Figura 3.18) é digital. Possui 32 canais, para assim enviar sinais para cada um dos dois lados das seis válvulas usadas na Plataforma Stewart e mais as quatro da Plataforma Vertical. Esta saída é de 24 V, pois é esta a tensão de trabalho da válvula. Esta válvula tem um período de envio de dados de 500 μ s.

Já na aquisição de dados, serão obtidos dados de potenciômetros lineares (LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*). Os LVDT (Figura 3.17) são sensores para medição de deslocamento linear. O funcionamento de deste sensor é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Ele dá como saída um sinal linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que está fixado ou em contato com o que se deseja medir. A bobina central é chamada de primária e as demais são chamadas de secundárias. Para esta medição, uma corrente alternada é aplicada na bobina primária, fazendo com que uma tensão seja induzida em cada bobina secundária proporcionalmente à indutância mútua com a bobina primária. A frequência da corrente alternada está geralmente entre 1 e 10 kHz. De acordo com a movimentação do núcleo, esta indutância mútua muda, fazendo com que as tensões nas bobinas secundárias mude também [11].

As bobinas são conectadas em série reversa. Com isso a tensão de saída é a diferença entre as duas tensões secundárias. Quando o núcleo está na posição central, equidistante em relação às duas bobinas secundárias, tensões de mesma amplitude, porém opostas são induzidas nestas duas bobinas, assim, a tensão de saída é zero. Quando o núcleo é movimentado em uma direção a tensão em uma das bobinas secundárias aumenta enquanto a outra diminui, fazendo com que a tensão aumente de zero para um máximo. Esta tensão está

em fase com a tensão primária. Quando o núcleo se move em outra direção, a tensão de saída também aumenta de zero para um máximo, mas sua fase é oposta à fase primária. A amplitude da tensão de saída é proporcional à distância movida pelo núcleo (até o seu limite de curso), sendo por isso a denominação "linear" para o sensor. Assim, a fase da tensão indica a direção do deslocamento [11].

Como o núcleo não entra em contato com o interior do tubo, ele pode mover-se livremente, quase sem atrito, fazendo do LVDT um dispositivo de alta confiabilidade. Além disso, a ausência de contatos deslizantes ou girantes permite que o LVDT esteja completamente selado das condições do ambiente [11].

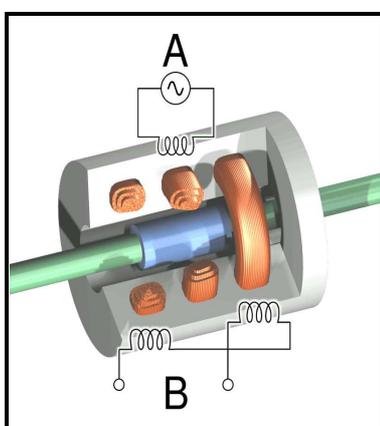


Figura 3.17: Esquema de um LVDT.

Para adquirir estes dados, serão usadas placas com entradas de sinal analógico (NI 9205; Figura 3.18), uma vez que a posição da haste do pistão é uma variável contínua. Serão 32 canais independentes ou 16 diferenciais, 16 bits de resolução, com tensões de ± 10 V (valores máximo e mínimo, podendo-se trabalhar dentro desta faixa) e taxa de amostragem de 250 kS/s [8].



Figura 3.18: Placas NI adquiridas para o controle da plataforma (NI 9205 à esquerda e NI 9476 à direita).



Figura 3.19: Chassi do sistema de aquisição/emissão de dados.

O circuito analógico para tratar o sinal a ser enviado usado com o sensor para captar o sinal do cilindro é mostrado na Figura 3.20 [8].

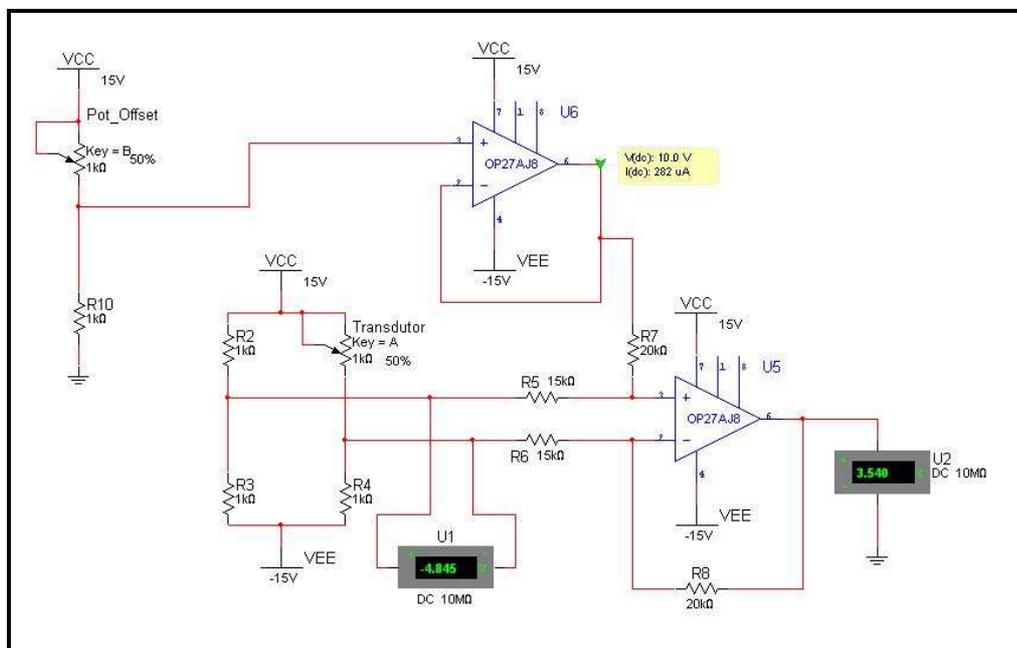


Figura 3.20: Circuito para tratamento do sinal de entrada do sensor.

O potenciômetro será colocado em uma ponte de Wheatstone e os terminais da ponte ligados em um amplificador operacional configurado em função diferencial de ganho 1,33. O sinal que deve entrar na placa de aquisição de dados usada deve variar entre 10 e -10 Volts para aproveitarmos a maior resolução possível. Para isso precisamos de uma alimentação de no mínimo $V_{cc} = +10V$ e $V_{ee} = -10V$. Porém, como não são usados amplificadores *Rail-to-Rail*, usa-se $V_{cc} = +15V$ e $V_{ee} = -15V$. Para o melhor funcionamento da ponte de Wheatstone, os resistores que a completam (R_2 , R_3 e R_4) deverão ter a mesma resistência do potenciômetro a ser usado como sensor. O amplificador operacional U_6 dará um ganho de no sistema definido pelo potenciômetro P_{ot_offset} .

3.3 CONSTRUÇÃO

Com o projeto definido, foram construídas os simuladores projetados. Estes simuladores são feitas em aço, fenolite e outros materiais, como os plásticos usados nas juntas universais. Na Plataforma Stewart, a base é feita em aço SAE 1020 e o topo em fenolite, um material compósito, isto porque, com uma base maior e mais pesada, pode-se dar maior rigidez e estabilidade à Plataforma, impedindo assim, comportamentos não desejados, como o tombamento da Plataforma em determinados tipos de movimentação. O fenolite foi escolhido, por se tratar de um material leve e com resistência suficiente para resistir aos esforços que serão aplicados a ele. O fenolite é um laminado industrial termofixo, duro e denso, feito por aplicação de calor e pressão em camadas de celulose impregnadas com resinas sintéticas (fenólicas). Quando o calor e a pressão são aplicados simultaneamente às camadas, uma reação química (polimerização) ocorre, aglomerando as camadas em uma massa sólida e compacta. A base e o topo constituem-se de hexágonos irregulares com dois tamanhos de lados diferentes dispostos sempre de forma oposta e adjacente (como se pode observar na Figura 3.11). Os desenhos técnicos da base e do topo se encontram no Anexo A. No Simulador Vertical, os cilindros são fixos em duas chapas de madeira com reforço de alumínio. Para apoiar o Simulador foram usados quatro amortecedores de impacto. Para apoiar as rodas e fazê-las seguir o movimento vertical da haste do pistão, foram construídos apoios em forma de “U” com os braços inclinados, para que as rodas não escapem do atuador quando este começar a se movimentar.

No projeto da Plataforma Stewart, foi previsto o uso de juntas universais acoplando a base com os cilindros e juntas esféricas para acoplar o topo com a haste dos pistões. Porém, foi encontrada certa dificuldade em obter juntas esféricas que se enquadrassem no projeto, devido às características necessárias de dimensão e encaixe. Portanto, uma outra solução foi usada de modo a não perder os graus de liberdade da Plataforma. Ao invés de usar uma junta esférica (com os três ângulos de rotação de liberdade), foi usada uma junta universal (com dois ângulos de liberdade) em uma montagem na qual a junta como um todo fica livre para girar ao redor do seu próprio eixo, uma vez que a haste do pistão também pode fazê-lo e este tipo de movimento não prejudica o funcionamento do pistão, formando assim o grau de liberdade que faltava à junta universal. As duas plataformas

(a Stewart e o Simulador Vertical, com três graus de liberdade) se encontram no LCA (Figuras 3.21 e 3.22).



Figura 3.21: Plataforma Stewart construída.



Figura 3.22: Simulador Vertical construído.

Assim, com os simuladores construídos, foi feita a união dos sistemas pneumáticos e eletrônicos às plataformas de simulação. As válvulas 5/3 vias foram conectadas aos cilindros em suas saídas e ao compressor em sua entrada de alimentação. Para isso, foi usada uma tubulação de polietileno com 4 mm de diâmetro interno. Das válvulas, saem os fios de transmissão de dados responsáveis pelo envio de sinais digitais de 24 VDC vindos da placa de emissão de dados, que, através de uma interface USB, está acoplada ao computador, onde as rotinas são programadas em *LabView*. Para alimentar esta placa de emissão, é usada uma

fonte de 24 V em corrente contínua (detalhe da placa e das válvulas montadas na bancada na Figura 3.23). A bancada com todos os elementos construídos pode ser vista na Figura 3.24.

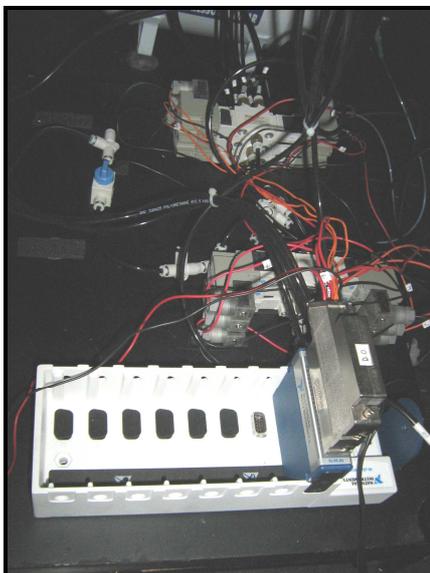


Figura 3.23: Placa de emissão de dados (em baixo, à direita) e válvulas (em cima).

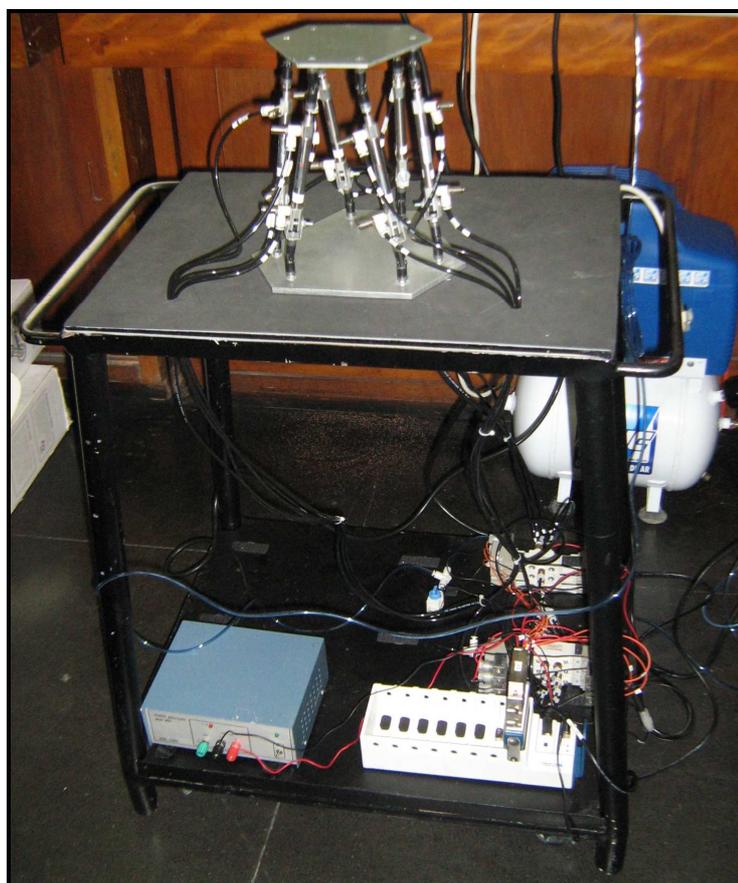


Figura 3.24: Bancada para a Plataforma Stewart.

3.4 FUNCIONAMENTO

Nesta seção será mostrado como são construídas as *VI's (Virtual Instruments)*, códigos em linguagem G feitos no programa *LabView*, responsáveis pela lógica de envio de sinais, pelas placas de emissão da *National Instruments*, às válvulas solenóides para assim, comandar a movimentação dos atuadores nos dois simuladores construídos.

3.4.1 Plataforma Stewart

Primeiramente, será mostrado o método usado para o ajuste de vazão nos atuadores da Plataforma Stewart. Em cada entrada do cilindro atuador são colocados reguladores de vazão, responsáveis pelo controle de velocidade do atuador. Este controle é feito manualmente, através de um parafuso de ajuste e deve ser feito antes de iniciar o uso da Plataforma, para que todos os atuadores se movam, nos dois sentidos (para cima e para baixo) com a mesma velocidade. Se alguma velocidade específica for desejada, deve-se usar este método de ajuste, porém, com o auxílio de algum instrumento para medir a velocidade desejada com a precisão requerida.

Neste método, a lógica de programação é bem simples. O programa envia sinais sincronizados para todos os lados das válvulas responsáveis pela passagem de ar inferior nos cilindros e, depois de certo tempo (normalmente alguns segundos), para os lados responsáveis pela passagem de ar superior, fazendo assim, com que a Plataforma se mova para cima e para baixo com certa frequência (determinada pelo tempo entre o envio dos dados). Com a Plataforma realizando este movimento, faz-se o ajuste da vazão em cada lado de cada cilindro até que todos os atuadores estejam se movendo na mesma velocidade. A *VI* responsável por esta rotina é mostrada na Figura 3.25.

Na *VI* apresentada para o ajuste de vazão, temos 12 entradas de sinal booleano (verdadeiro ou falso) acompanhadas de seus respectivos leds indicadores. Com estas entradas, constrói-se um vetor de 12 elementos, sendo cada um correspondente a um dos sentidos de movimento de cada cilindro, que é passado para a placa através da caixa “*DAQ Assistant*”, e assim, é transformada em sinais elétricos de 24 V que acionam as válvulas solenóides. Na figura apresentada (Figura 3.26) foi mostrada apenas a última parte do programa, por sua extensão.

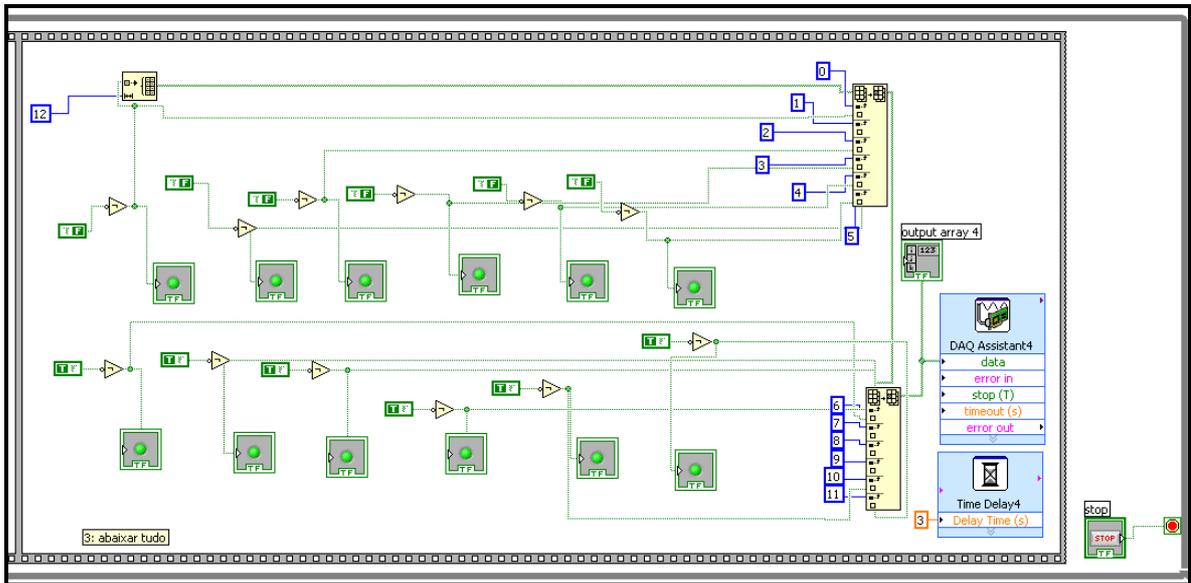


Figura 3.25: VI para o ajuste de vazão na Plataforma Stewart.

Outras VIs foram feitas com o intuito de realizar diferentes movimentos com a Plataforma. Porém, todas ainda funcionam segundo a mesma lógica, na qual sinais booleanos são pré-definidos e enviados à placa de emissão de dados. Com esta lógica, é possível realizar alguns movimentos simples, sem controle sobre as amplitudes do movimento, como o movimento de elevação, de rotação e inclinação nos diferentes ângulos que a Plataforma pode trabalhar.

Para testar o funcionamento de cada atuador separadamente na Plataforma, foi implementada uma rotina na qual o usuário escolhe individualmente, através de botões, qual atuador subirá ou descera. Também se podem dar comandos de tal forma que os atuadores parem em posições intermediárias, como mostra o painel frontal da Figura 3.27.



Figura 3.26: Painel frontal da rotina de teste.

Nesta implementação, os sinais são enviados para a placa de emissão de dados através de um vetor constituído de elementos que correspondem ao valor booleano (verdadeiro ou falso) associado aos botões para o acionamento em cada lado do atuador, fazendo-o subir (acionando o botão que libera a passagem de ar na parte de baixo do atuador), descer (acionando o botão que libera a passagem de ar na parte de cima do atuador), podendo parar em uma posição intermediária, se o ar pressurizado for liberado em ambas as entradas.

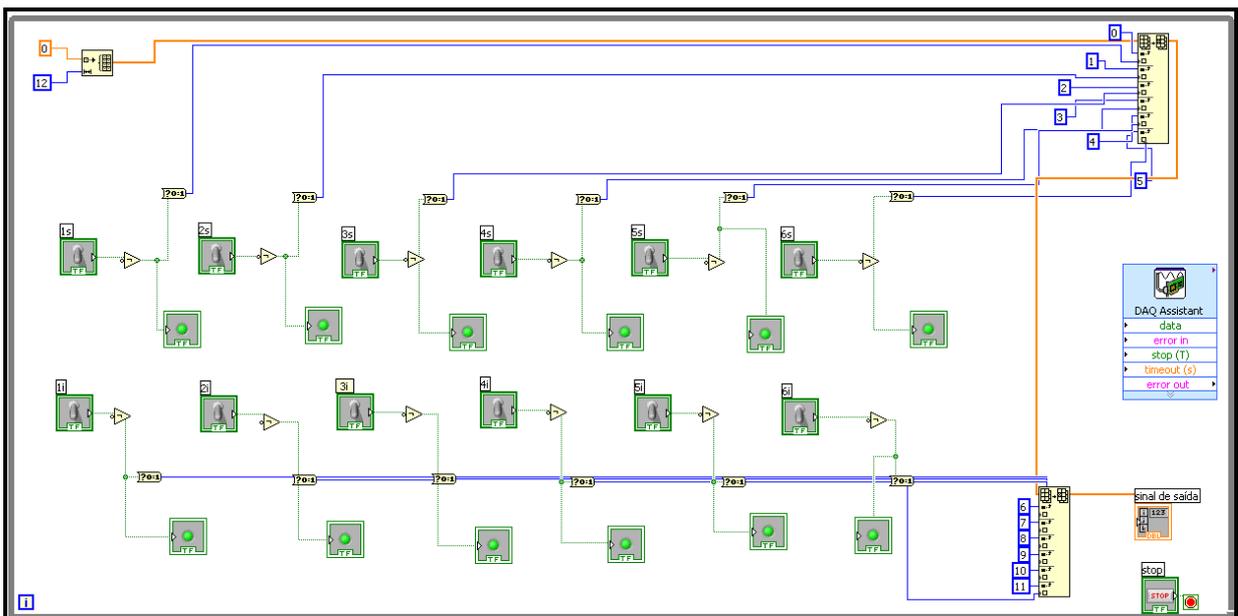


Figura 3.27: Diagrama de blocos da rotina de teste.

Para realizar o controle, em malha fechada, da movimentação da Plataforma Stewart, um *VI* (*Virtual Instrument*) foi feita no *LabView* (Figura 3.28) [8], porém, como a Plataforma ainda não dispõe de sensores, esta rotina ainda não é usada, mas está pronta para eventuais trabalhos futuros.

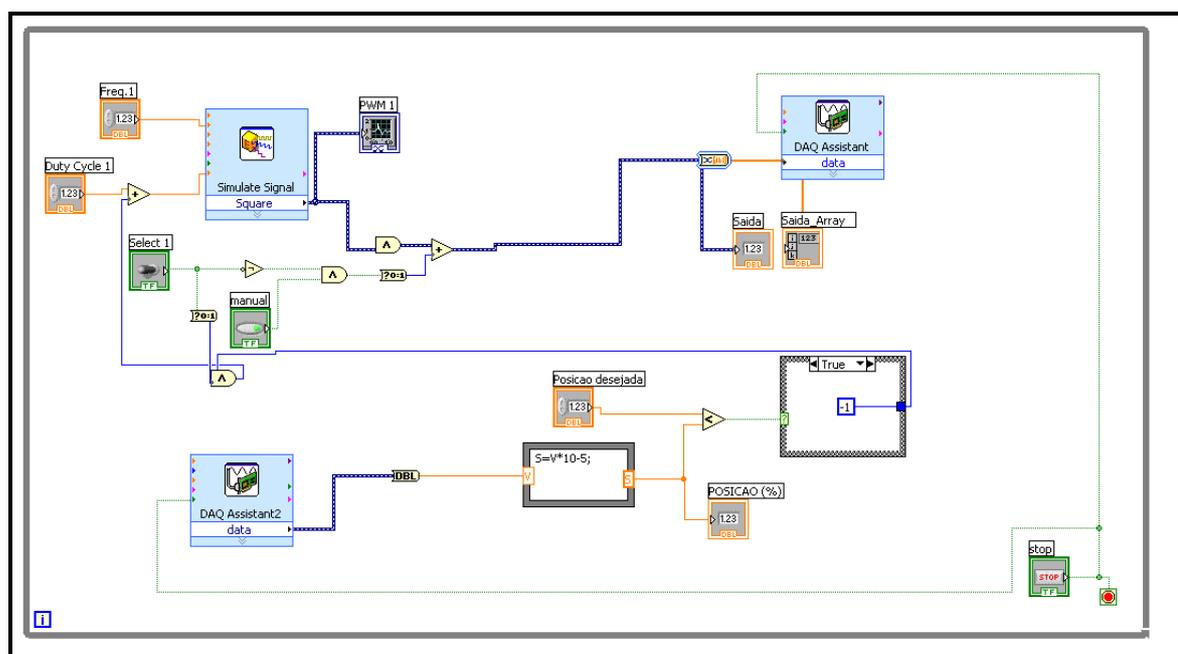


Figura 3.28: *VI* para testar a movimentação de cada cilindro (em malha fechada).

Deve-se ter dois *DAQ Assistant* – um para ler o sinal do circuito com o sensor de posição e outro para escrever nos atuadores o sinal com o comando a ser enviado às válvulas.

Um “*Case Structure*” deve ser montado para transferir o dado que vem do circuito de tensão para posição. Uma realimentação dessa informação deve chegar à lógica do PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por largura de banda) fazendo assim a malha fechada do sistema.

3.4.2 Simulador Vertical

Um esquema de como funciona este sistema que comanda as ações do atuador pode ser encontrado na Figura 3.29 (esquema plano) e na Figura 3.30 (esquema tridimensional) [3]. Nestes esquemas pode-se observar o sistema de alimentação dos componentes pneumáticos da bancada que é composto por um compressor seguido de um filtro e de um regulador de pressão. No sistema construído o único elemento que ainda não

existirá nesta fase são os sensores no veículo e no Simulador, cujos sinais são usados na realimentação do sistema de controle da bancada.

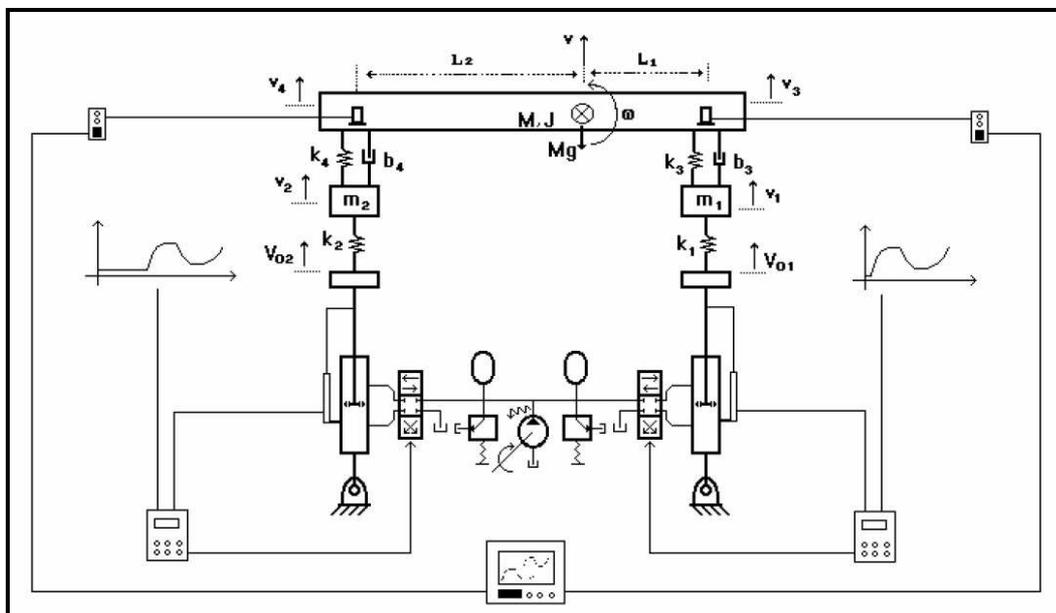


Figura 3.29: Esquema do Simulador Vertical – Modelo plano.

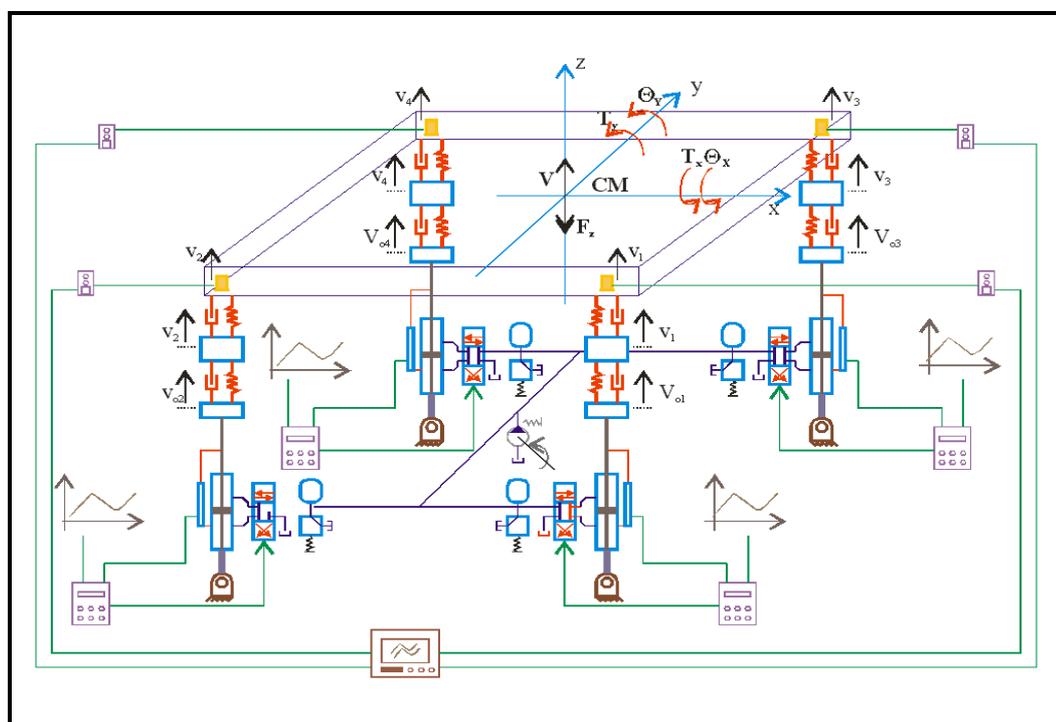


Figura 3.30: Esquema do Simulador Vertical – Modelo tridimensional.

Assim como na Plataforma Stewart, também foi feita uma rotina para o ajuste de vazão nos atuadores da bancada, como mostrada na Figura 3.31. Esta rotina é similar à rotina de ajuste de vazão da Plataforma Stewart, porém, o vetor criado tem apenas 8 elementos, já

que são apenas 4 atuadores. Também foram feitas rotinas para os movimentos básicos aplicáveis pelo Simulador, tais como a elevação (todos os atuadores sobem ao mesmo tempo), a torção (dois atuadores diagonalmente opostos sobem e os outros dois descem), a guinada (dois atuadores frontais ou os dois atuadores traseiros sobem ao mesmo tempo) e a rolagem (dois atuadores laterais esquerdos ou os dois atuadores laterais direitos sobem simultaneamente).

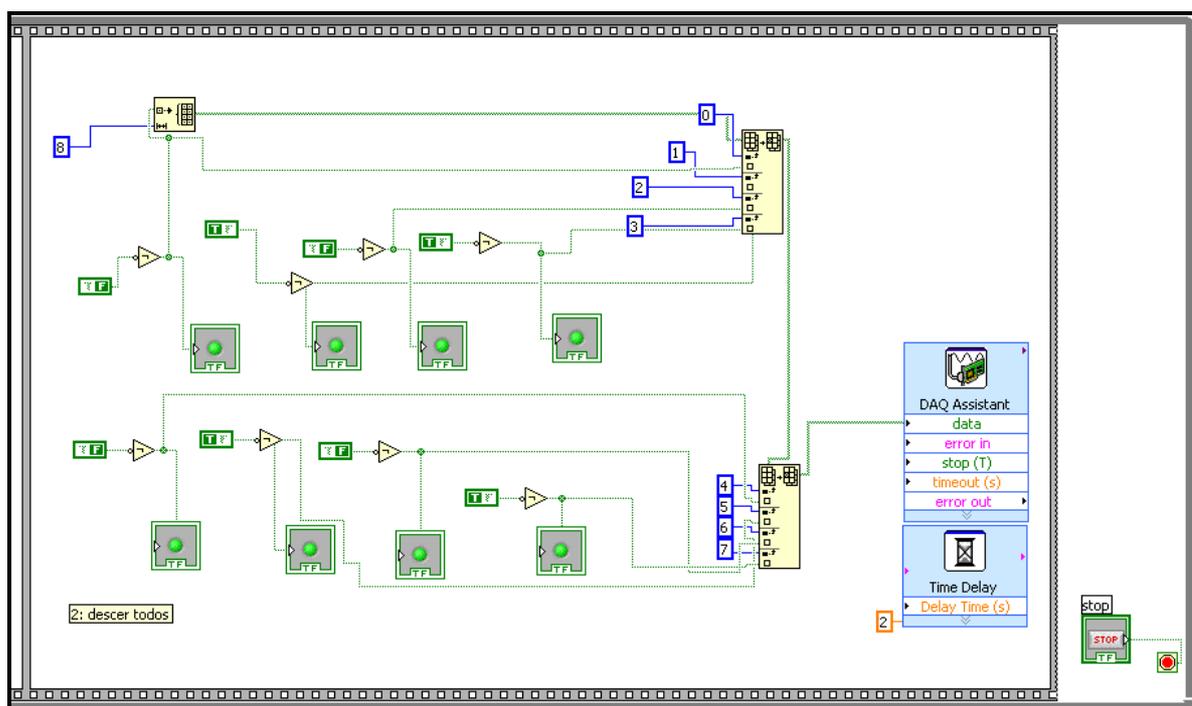


Figura 3.31: Rotina para o ajuste de vazão nos atuadores do Simulador Vertical.

Para realizar testes de resposta em frequência, foram desenvolvidas uma série de rotinas em *LabView* como a mostrada na Figura 3.32. Na rotina mostrada, o usuário escolhe a frequência de excitação a ser atuada em cada roda. Depois do devido tratamento (os sinais são alocados em um único vetor dinâmico de valores 1 e 0) estes são passados para a placa de aquisição de sinais digitais, que processa estas informações e as envia para as válvulas já como pulsos elétricos de 24 VDC, para que estas liberem ou fechem a passagem de ar para as vias do cilindro que então, se movimenta de acordo com o comando dado.

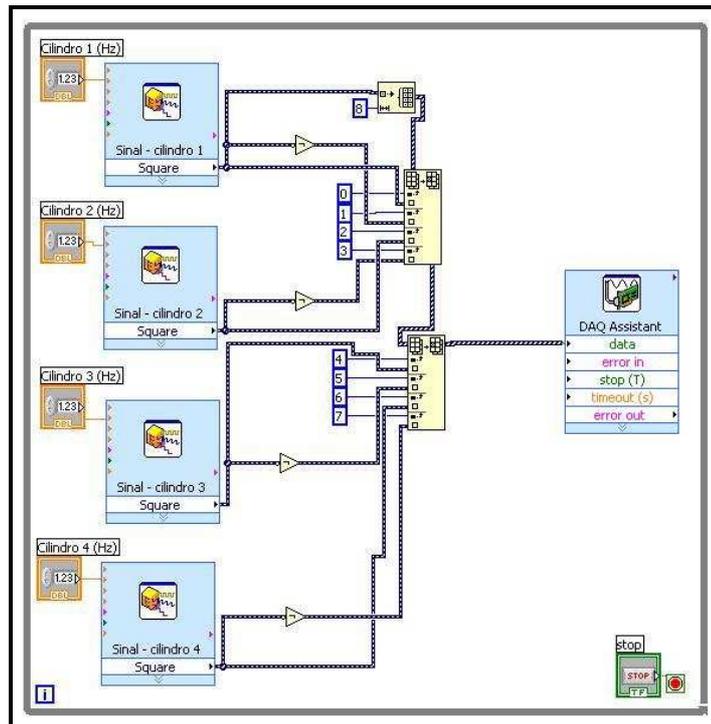


Figura 3.32: Diagrama de blocos em *LabView* para entrada controlada pela frequência.

Nesta rotina, o usuário entra com os valores das frequências a serem excitadas em cada atuador separadamente para assim, poder simular diversas condições de terreno que o veículo pode enfrentar (em diferentes velocidades) e analisar a resposta no comportamento do sistema.

Para realizar testes mais específicos e assim, avaliar o comportamento do veículo em determinadas situações, foram feitas rotinas para avaliar a resposta em frequência para três tipos de excitações de base: arfagem, rolagem e torção. No teste em frequência da arfagem, as duas rodas dianteiras e traseiras são excitadas com a frequência determinada pelo usuário (Figura 3.33; o ciclo corresponde ao movimento de subida e descida nos atuadores dianteiros e traseiros) com uma defasagem, de tal maneira que quando as rodas dianteiras começam a subida, começa a descida das rodas traseiras. A rotina implementada pode ser observada na Figura 3.34.



Figura 3.33: Painel frontal do teste de arfagem.

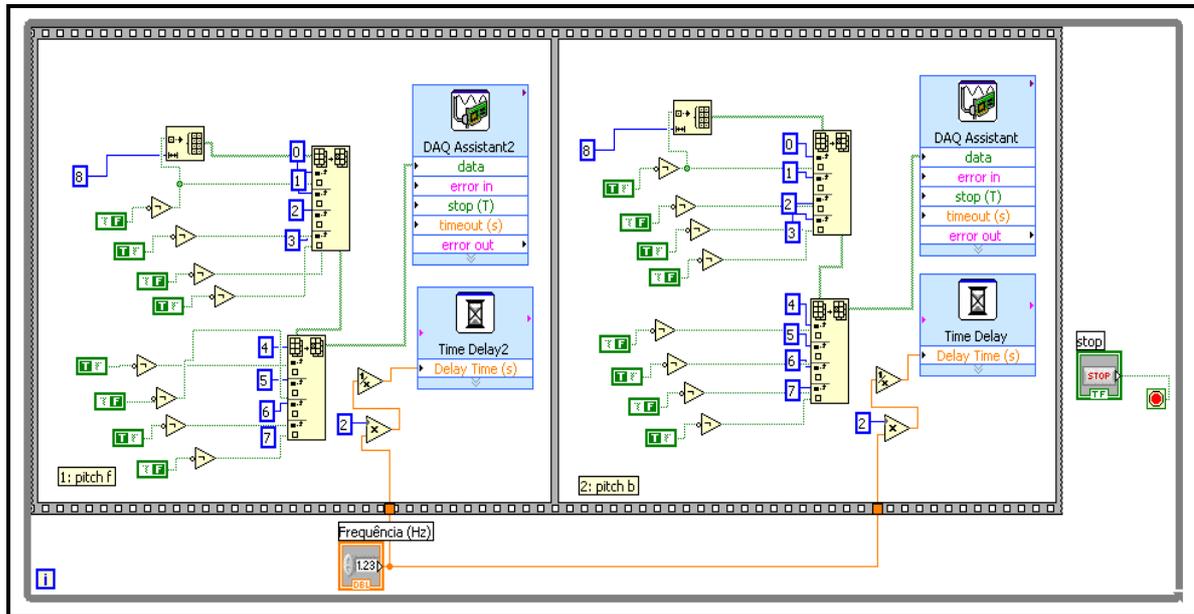


Figura 3.34: Diagrama de blocos em LabView para o teste de arfagem.

A rotina dos testes de rolagem e de torção são semelhantes ao de arfagem, porém, na rolagem, movem-se o par de rodas laterais direitas defasado do par de rodas laterais esquerdas e na torção, movem-se o par de rodas diagonalmente opostas. A interface para o usuário pode ser vista nas Figuras 3.35 e 3.36.



Figura 3.35: Painel frontal do teste de rolagem.



Figura 3.36: Painel frontal do teste de torção.

4 Simulações em *MatLab*

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os modelos físicos e matemáticos relacionados aos veículos sujeitos às simulações, ou seja, serão mostradas as equações de estado que descrevem o comportamento das variáveis analisadas. Será mostrada a rotina implementada em *MatLab* e assim, serão apresentadas as simulações para analisar a resposta do sistemas a diversos tipos de entradas (excitações de base, no caso). Também serão feitas outras análises, como a dos modos de vibrações do veículo sujeito a estas condições.

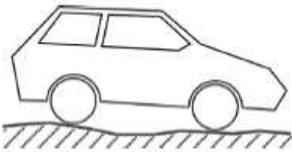
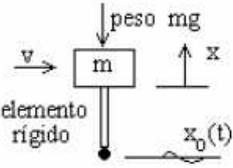
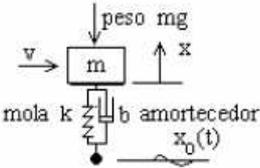
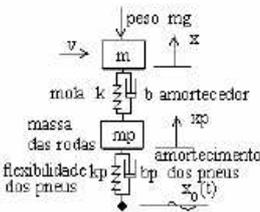
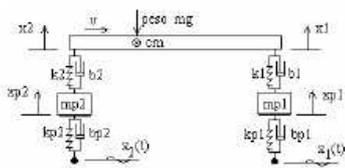
SISTEMA REAL	MODELOS FÍSICOS	MOD. MATEMÁTICOS
		$\dot{x} = x_0(t)$
		$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx =$ $b\dot{x}_0(t) + kx_0(t) - mg$
		$M\ddot{X} + B\dot{X} + KX =$ $B\dot{X}_0(t) + KX_0(t) - Mg$ $c / X = [x \ x_p]$
		$M\ddot{X} + B\dot{X} + KX =$ $B\dot{X}_0(t) + KX_0(t) - Mg$ $c / X = [x_1 \ x_2 \ x_{p1} \ x_{p2}]$ $e \ X_0 = [x_{01} \ x_{02}]$

Figura 4.1: Modelo Físico x Modelo Matemático.

4.2 MODELOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS [5]

Nesta seção, serão descritos os modelos matemáticos que servirão de base para a análise da dinâmica vertical de um veículo terrestre. Vários tipos de modelos físicos e matemáticos podem ser adotados, dependendo de quais variáveis de entrada e saída se quer analisar e também do grau de exatidão que se quer obter na resposta. A Figura 4.1 mostra exemplos de vários tipos de modelos físicos e matemáticos que descrevem a suspensão de um veículo terrestre [2].

Em um primeiro momento, uma análise simplificada será feita com um modelo que leva em consideração apenas uma metade do veículo, ou seja, é um modelo plano (Figura 4.2). É um modelo físico plano para um veículo terrestre sobre suspensão, empregado para análise e controle da sua dinâmica vertical. O modelo de estado deste sistema, relacionando as entradas F_Z , M_Y , F_1 , F_2 , Z_{01} , Z_{02} com os seus graus de liberdade (z , θ , z_1 e z_2) e suas derivadas é dado pela Equação 1.

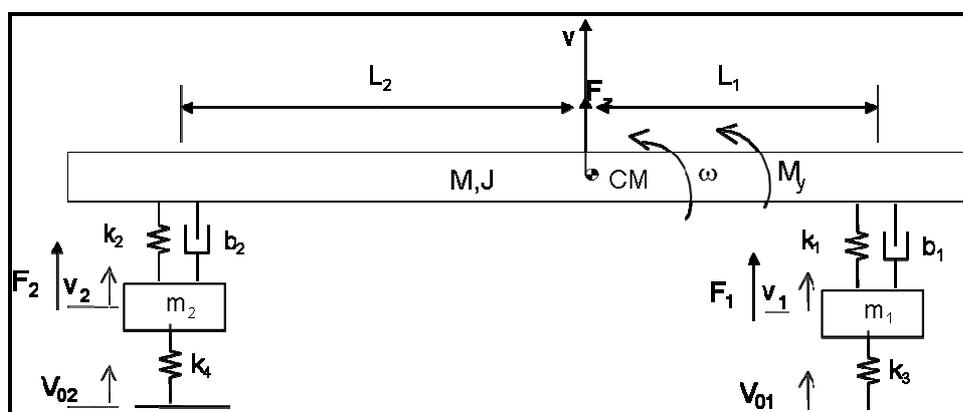


Figura 4.2: Modelo físico plano.

Será apresentado também o modelo para o sistema com 7 graus de liberdade. Neste sistema, todas as rodas e conjuntos de suspensões do veículo são considerados, tornando-o assim um modelo matemático tridimensional (Figura 4.3). Os 7 graus de liberdade são: o deslocamento vertical (*bounce* ou *heave* ou *ride*) da massa suspensa (chassis), deslocamentos verticais das massas não-suspensas (pneus e rodas) e as rotações em torno dos eixos longitudinal (x) de rolagem (*roll*) e lateral (y) de galope ou arfagem (*pitch*).

(Equação 1)

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{v} \\ \dot{\omega} \\ \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \theta \\ z_1 \\ z_2 \\ v \\ \omega \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_z \\ M_y \\ F_1 \\ F_2 \\ Z_{01} \\ Z_{02} \end{bmatrix}$$

Esse modelo tridimensional permite tratar da dinâmica vertical de um veículo terrestre baseado nas seguintes hipóteses: pequenos ângulos do chassis; vínculo entre as massas suspensas e não-suspensas através das suspensões que possuem apenas pequeno deslocamento relativo vertical; elementos complacentes (molas e amortecedores da suspensão, e efeitos de rigidez e amortecimentos dos pneus) com comportamento linear; veículo simétrico em relação ao eixo x ou plano xz (produtos de inércia nulos); eixo de rolagem e galope coincidentes com os eixos x e y respectivamente; excitações de base impostas nas massas não-suspensas.

Com este modelo matemático fechado pode-se determinar as frequências e os modos de vibração do sistema, assim como realizar a sua simulação computacional ou mesmo obter a solução analítica para excitações pré-estabelecidas e condições iniciais definidas. As equações de movimento são determinadas diretamente da aplicação das leis de Newton ao modelo físico em questão. Neste caso encontra-se a forma matricial:

$$M\ddot{\vec{Z}} + B\dot{\vec{Z}} + K\vec{Z} = E\vec{F} + \bar{K}_p\vec{Z}_0 + \bar{B}_p\vec{V}_0 \quad (\text{Equação 2})$$

, onde o vetor com os deslocamentos dos graus de liberdade é dado por:

$$\vec{Z} = [z \quad \theta_x \quad \theta_y \quad z_{DD} \quad z_{DE} \quad z_{TD} \quad z_{TE}]^T$$

Os vetores de entrada de esforços e deslocamentos e velocidades de base são:

$$E\vec{F} = [F_z \quad M_x \quad M_y \quad F_{DD} \quad F_{DE} \quad F_{TD} \quad F_{TE}]^T,$$

$$\vec{Z}_0 = [Z_0^{DD} \quad Z_0^{DE} \quad Z_0^{TD} \quad Z_0^{TE}]^T \text{ e } \frac{d\vec{Z}_0}{dt} = \vec{V}_0 = [V_0^{DD} \quad V_0^{DE} \quad V_0^{TD} \quad V_0^{TE}]^T$$

As matrizes indicando quais graus de liberdade são excitados diretamente pelas entradas, respectivamente, de esforços (através de E), de deslocamentos de base (através de \bar{K}_p) e de velocidade de base (através de \bar{B}_p), são dadas por:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \bar{K}_p = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 4} \\ K_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_p^{DD} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_p^{DE} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_p^{TD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_p^{TE} \end{bmatrix} \quad \bar{B}_p = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 4} \\ B_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_p^{DD} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_p^{DE} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_p^{TD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_p^{TE} \end{bmatrix}$$

,onde $E = I_{7 \times 7}$ está associada às forças verticais, que podem ser devidas aos pesos do chassis e das roda, e atuam no sentido negativo do eixo z, e aos momentos nos eixos x e y do chassis, devido às forças de tração, frenagem e laterais, transmitidas pelas suspensões. As matrizes K_p e B_p contêm, respectivamente, a rigidez e a dissipação de cada pneu individualmente.

A matriz de massa, ou de inércia generalizada, é:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{DD} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{DE} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{TD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{TE} \end{bmatrix}$$

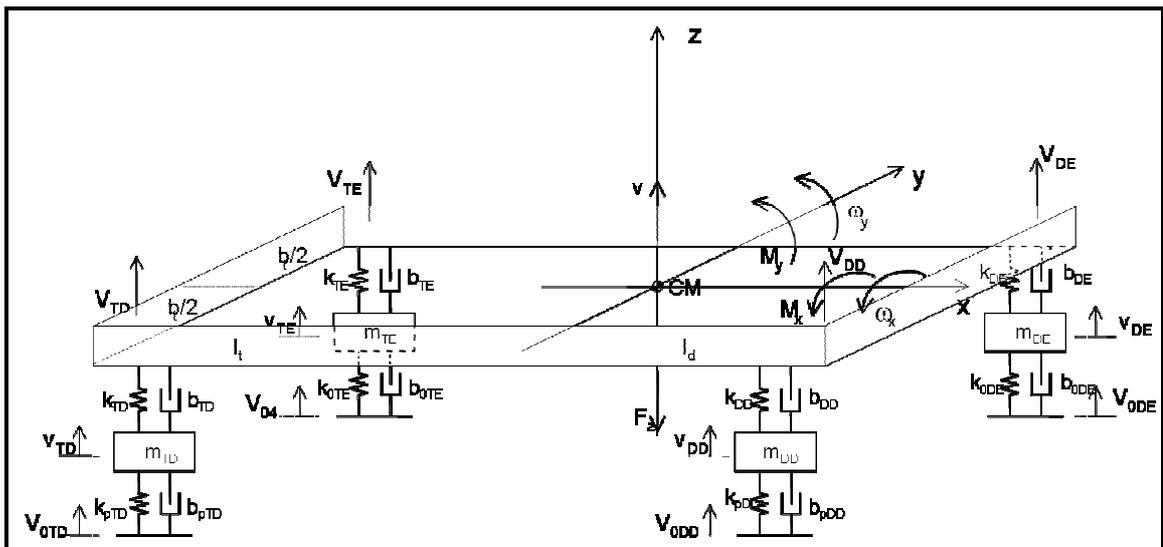


Figura 4.3: Modelo físico tridimensional.

E as matrizes de amortecimento (B) e de rigidez (K) do sistema de 7 graus de liberdade são dadas a seguir:

$$\begin{aligned}
\mathbf{B} = & \begin{bmatrix}
(b_{DD} + b_{DE} + b_{TD} + b_{TE}) & (b_{DE} - b_{DD}) \frac{b_d}{2} + (b_{TE} - b_{TD}) \frac{b_i}{2} & -b_{DD} & -b_{DE} & -b_{TD} & -b_{TE} \\
(b_{DE} - b_{DD}) \frac{b_d}{2} + (b_{TE} - b_{TD}) \frac{b_i}{2} & (b_{DE} + b_{DD}) \left(\frac{b_d}{2}\right)^2 + (b_{TE} + b_{TD}) \left(\frac{b_i}{2}\right)^2 & b_{DD} \frac{b_d}{2} & -b_{DE} \frac{b_d}{2} & b_{TD} \frac{b_i}{2} & -b_{TE} \frac{b_i}{2} \\
((b_{TD} + b_{TE}) \ell_i - (b_{DD} + b_{DE}) \ell_d) & 0 & b_{DD} \frac{b_d}{2} & -b_{DE} \frac{b_d}{2} & b_{TD} \frac{b_i}{2} & -b_{TE} \frac{b_i}{2} \\
(b_{TD} + b_{TE}) \ell_i^2 + (b_{DD} + b_{DE}) \ell_d^2 & 0 & b_{DD} \ell_d & b_{DE} \ell_d & -b_{TD} \ell_i & -b_{TE} \ell_i \\
-b_{DD} & b_{DD} \frac{b_d}{2} & (b_{DD} + b_p^{DD}) & 0 & 0 & 0 \\
-b_{DE} & -b_{DE} \frac{b_d}{2} & (b_{DE} + b_p^{DE}) & 0 & 0 & 0 \\
-b_{TD} & b_{TD} \frac{b_i}{2} & 0 & 0 & (b_{TD} + b_p^{TD}) & 0 \\
-b_{TE} & -b_{TE} \frac{b_i}{2} & 0 & 0 & 0 & (b_{TE} + b_p^{TE})
\end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{K} = & \begin{bmatrix}
(k_{DD} + k_{DE} + k_{TD} + k_{TE}) & (k_{DE} - k_{DD}) \frac{k_d}{2} + (k_{TE} - k_{TD}) \frac{k_i}{2} & -k_{DD} & -k_{DE} & -k_{TD} & -k_{TE} \\
(k_{DE} - k_{DD}) \frac{k_d}{2} + (k_{TE} - k_{TD}) \frac{k_i}{2} & (k_{DE} + k_{DD}) \left(\frac{k_d}{2}\right)^2 + (k_{TE} + k_{TD}) \left(\frac{k_i}{2}\right)^2 & k_{DD} \frac{k_d}{2} & -k_{DE} \frac{k_d}{2} & k_{TD} \frac{k_i}{2} & -k_{TE} \frac{k_i}{2} \\
((k_{TD} + k_{TE}) \ell_i - (k_{DD} + k_{DE}) \ell_d) & 0 & k_{DD} \frac{k_d}{2} & -k_{DE} \frac{k_d}{2} & k_{TD} \frac{k_i}{2} & -k_{TE} \frac{k_i}{2} \\
(k_{TD} + k_{TE}) \ell_i^2 + (k_{DD} + k_{DE}) \ell_d^2 & 0 & k_{DD} \ell_d & k_{DE} \ell_d & -k_{TD} \ell_i & -k_{TE} \ell_i \\
-k_{DD} & k_{DD} \frac{k_d}{2} & (k_{DD} + k_p^{DD}) & 0 & 0 & 0 \\
-k_{DE} & -k_{DE} \frac{k_d}{2} & (k_{DE} + k_p^{DE}) & 0 & 0 & 0 \\
-k_{TD} & k_{TD} \frac{k_i}{2} & 0 & 0 & (k_{TD} + k_p^{TD}) & 0 \\
-k_{TE} & -k_{TE} \frac{k_i}{2} & 0 & 0 & 0 & (k_{TE} + k_p^{TE})
\end{bmatrix}
\end{aligned}$$

A partir das equações de movimento pode-se determinar facilmente um modelo na forma:

$$\begin{cases} \dot{\vec{X}} = A\vec{X} + B\vec{U} \\ \vec{Y} = C\vec{X} + D\vec{U} \end{cases} \quad (\text{Equação 3})$$

, onde

$$\vec{X} = [\vec{Z} \quad \vec{V}]^T$$

é o vetor de estado 14×1 obtido a partir da união dos deslocamentos dos graus de liberdade \vec{Z} e da sua derivada no tempo $\vec{V} = d\vec{Z}/dt$, as velocidades dos graus de liberdade, formando o conjunto das chamadas variáveis de estado lagrangeanas,

$$\vec{U} = [\vec{F} \quad \vec{Z}_0 \quad \vec{V}_0]^T$$

é o vetor de entradas 15×1 ,

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{7 \times 7} & I_{7 \times 7} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}B \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 4})$$

é a matriz de estado 14×14 , e

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{7 \times 7} & \mathbf{0}_{7 \times 4} & \mathbf{0}_{7 \times 4} \\ M^{-1}E & M^{-1}\bar{K}_p & M^{-1}\bar{B}_p \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 5})$$

é a matriz de entradas 14×15 , que não deve ser confundida com a matriz de amortecimento do modelo em equações de movimento.

O vetor de saídas \vec{Y} pode ser escolhido como qualquer variável de interesse do sistema, desde que essas possam ser determinadas por combinações lineares das variáveis de estado e das variáveis de entrada. Por exemplo, se:

$$\vec{Y} = [\vec{F}_0]$$

, onde \vec{F}_0 é o vetor 4×1 contendo as forças de contato dos pneus com o solo, então as matrizes que estabelecem a combinação linear que define tais variáveis de saída são:

$$C = \begin{bmatrix} -\bar{K}_p^T & -\bar{B}_p^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 3} & -K_p & 0_{4 \times 3} & -B_p \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -k_p^{DD} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -b_p^{DD} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_p^{DE} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -b_p^{DE} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_p^{TD} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -b_p^{TD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_p^{TE} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -b_p^{TE} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 7} & K_p & B_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_p^{DD} & 0 & 0 & 0 & b_p^{DD} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_p^{DE} & 0 & 0 & 0 & b_p^{DE} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_p^{TD} & 0 & 0 & 0 & b_p^{TD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_p^{TE} & 0 & 0 & 0 & b_p^{TE} \end{bmatrix}$$

4.3 ROTINA IMPLEMENTADA

Segue abaixo o programa de *MatLab* implementado para realizar as simulações no modelo físico plano. As entradas e saídas escolhidas foram Z_{02} e Z_{01} (excitações de base), z e θ , respectivamente. No programa apresentado, estão escolhidas a saída z (matriz C) e a entrada Z_{02} (último parâmetro de entrada da função *ss2tf*).

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all

%Parâmetros:

M = 1.4; %kg
J = 0.01; %kg*m^2
m1 = 0.06; %kg (massa de dois pneus)
m2 = 0.06; %kg (massa de dois pneus)
k1 = 916; %N/m (coeficiente de duas molas em paralelo)
k2 = 1020; %N/m (coeficiente de duas molas em paralelo)
k3 = 20000; %N/m (coeficiente de duas molas em paralelo)
k4 = 20000; %N/m (coeficiente de duas molas em paralelo)
b1 = 120; %N/m/s (coeficiente de dois amortecedores em paralelo)
b2 = 120; %N/m/s (coeficiente de dois amortecedores em paralelo)
L1 = 0.14; %m
L2 = 0.12; %m

%Matrizes A, B, C e D da Equação de Estado:

A = [0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0;
      0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0;
      0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0;
      0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1;
      -(k1 + k2)/M, (L1*k1 - L2*k2)/M, k1/M, k2/M, -(b1 + b2)/M, (L1*b1 -
      L2*b2)/M, b1/M, b2/M;
      (L1*k1 - L2*k2)/J, -(L2^2*k2 + L1^2*k1)/J, -(L1*k1)/J, L2*k2/J, (L1*b1
      - L2*b2)/J, -((L1^2)*b1 + (L2^2)*b2)/J, -(L1*b1)/J, L2*b2/J;

```

```

k1/m1, -(L1*k1)/m1, -(k1+k3)/m1, 0, b1/m1, -(L1*b1)/m1, -b1/m1, 0;
k2/m2, L2*k2/m2, 0, -(k2+k4)/m2, b2/m2, L2*b2/m2, 0, -b2/m2];

B = [0, 0, 0, 0, 0, 0;
     0, 0, 0, 0, 0, 0;
     0, 0, 0, 0, 0, 0;
     0, 0, 0, 0, 0, 0;
     1/M, 0, 0, 0, 0, 0;
     0, 1/J, 0, 0, 0, 0;
     0, 0, 1/m1, 0, k3/m1, 0;
     0, 0, 0, 1/m2, 0, k4/m2];

C = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; %vetor de saídas (z, no caso)

D = [0, 0, 0, 0, 0, 0]; %vetor de entradas (escolhidas com a função ss2tf)

%Mudança para Função de Transferência: (para inserir entradas ao sistema
pelo Simulink)

[numerador,denominador] = ss2tf(A,B,C,D,5); %calcula H(s) (para a entrada 5
(Z01));

%[numerador,denominador] = ss2zp(A,B,C,D,5); %mostra os pólos e zeros do
sistema (para a entrada 5 (Z01));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Para realizar as simulações, foi feito um diagrama de blocos no *Simulink/MatLab* (Figuras 4.4, 4.5 e 4.6) para inserir as entradas (impulso, degrau e senóide, respectivamente) ao sistema em questão.

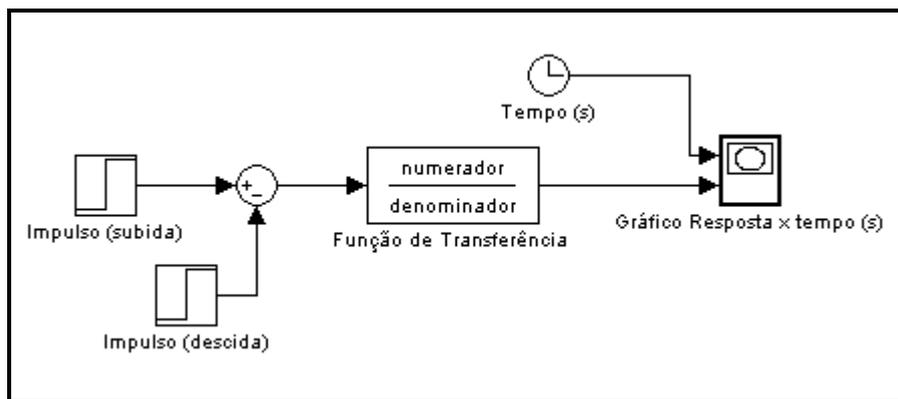


Figura 4.4: Diagrama para a entrada em impulso.

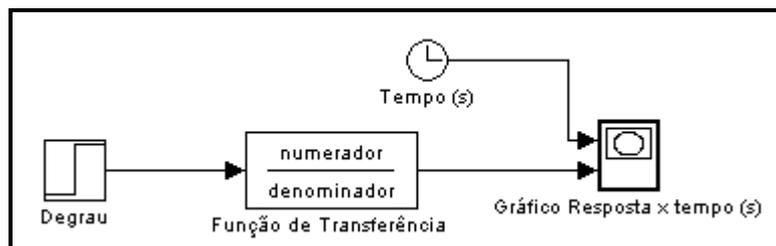


Figura 4.5: Diagrama para a entrada em degrau.

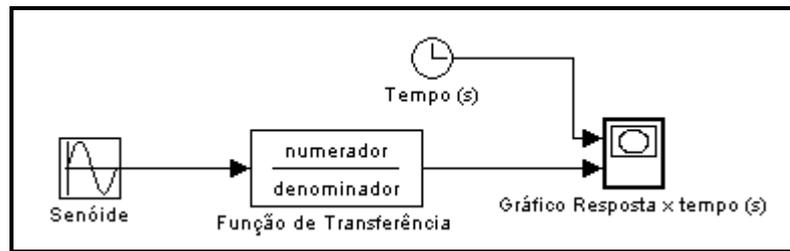


Figura 4.6: Diagrama para a entrada em senoide.

Para realizar as simulações no modelo físico tridimensional, foi implementada a seguinte rotina em *MatLab*. A entrada e as saídas escolhidas foram F_{DD} (excitação de base na roda dianteira direita), z e z_{DD} (posição vertical do centro de massa do chassi e da roda dianteira direita), respectivamente. Para realizar as simulações foram usados os mesmos diagramas de blocos do *Simulink* usados nas simulações do modelo físico plano.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all

%Parâmetros:

m = 1.4; %kg
Jx = 0.005; %kg*m^2
Jy = 0.01; %kg*m^2
mdd = 0.03; %kg
mde = 0.03; %kg
mtd = 0.03; %kg
mte = 0.03; %kg
kdd = 458; %N/m
kde = 458; %N/m
ktd = 510; %N/m
kte = 510; %N/m
kpdd = 10000; %N/m
kpde = 10000; %N/m
kptd = 10000; %N/m
kpte = 10000; %N/m
bdd = 60; %N/m/s
bde = 60; %N/m/s
btd = 60; %N/m/s
bte = 60; %N/m/s
bpdd = 100; %N/m/s
bpde = 100; %N/m/s
bptd = 100; %N/m/s
bpte = 100; %N/m/s
ld = 0.14; %m
lt = 0.12; %m
bd = 0.07; %m
bt = 0.07; %m

%Matrizes M, B, K, E, Kp, Bp, Z, F, Z0 e V0 das equações de movimento:

```

```

M = [m, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
      0, Jx, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
      0, 0, Jy, 0, 0, 0, 0, 0;
      0, 0, 0, mdd, 0, 0, 0, 0;
      0, 0, 0, 0, mde, 0, 0, 0;
      0, 0, 0, 0, 0, mtd, 0;
      0, 0, 0, 0, 0, 0, mte];

```

```

B = [(bdd+bde+btd+bte), (bde-bdd)*(bd/2)+(bte-btd)*(bt/2), (btd+bte)*lt-
      (bdd+bde)*ld, -bdd, -bde, -btd, -bte;
      (bde-bdd)*(bd/2)+(bte-btd)*(bt/2),
      (bde+bdd)*(bd/2)^2+(bte+btd)*(bt/2)^2, 0, bdd*bd/2, -bde*bd/2, btd*bt/2, -
      bte*bt/2;
      (btd+bte)*lt-(bdd+bde)*ld, 0, (btd+bte)*lt^2+(bdd+bde)*ld^2, bdd*ld,
      bde*ld, -btd*lt, -bte*lt;
      -bdd, bdd*bd/2, bdd*ld, bdd+bpdd, 0, 0, 0;
      -bde, -bde*bd/2, bde*ld, 0, bde+bpde, 0, 0;
      -btd, btd*bt/2, -btd*lt, 0, 0, btd+bptd, 0;
      -bte, -bte*bt/2, -bte*lt, 0, 0, 0, bte+bpte];

```

```

K = [(kdd+kde+ktd+kte), (kde-kdd)*(bd/2)+(kte-ktd)*(bt/2), (ktd+kte)*lt-
      (kdd+kde)*ld, -kdd, -kde, -ktd, -kte;
      (kde-kdd)*(bd/2)+(kte-ktd)*(bt/2),
      (kde+kdd)*(bd/2)^2+(kte+ktd)*(bt/2)^2, 0, kdd*bd/2, -kde*bd/2, ktd*bt/2, -
      kte*bt/2;
      (ktd+kte)*lt-(kdd+kde)*ld, 0, (ktd+kte)*lt^2+(kdd+kde)*ld^2, kdd*ld,
      kde*ld, -ktd*lt, -kte*lt;
      -kdd, kdd*bd/2, kdd*ld, kdd+kpdd, 0, 0, 0;
      -kde, -kde*bd/2, kde*ld, 0, kde+kpde, 0, 0;
      -ktd, ktd*bt/2, -ktd*lt, 0, 0, ktd+kptd, 0;
      -kte, -kte*bt/2, -kte*lt, 0, 0, 0, kte+kpte];

```

```

E = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
      0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
      0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0;
      0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0;
      0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0;
      0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0;
      0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1];

```

```

Kp = [0, 0, 0, 0;
       0, 0, 0, 0;
       0, 0, 0, 0;
       kpdd, 0, 0, 0;
       0, kpde, 0, 0;
       0, 0, kptd, 0;
       0, 0, 0, kpte];

```

```

Bp = [0, 0, 0, 0;
       0, 0, 0, 0;
       0, 0, 0, 0;
       bpdd, 0, 0, 0;
       0, bpde, 0, 0;
       0, 0, bptd, 0;
       0, 0, 0, bpte];

```

```

Z = [1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0]; %matriz de saídas (z, no caso)
Minv = inv(M);
F = [0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
Z0 = [0; 0; 0; 0;];
V0 = [0; 0; 0; 0;];

% matriz 0x7x7 (S)
for i=1:7
    for j=1:7
        S(i,j)=0;
    end
end

% matriz 0x7x4 (Q)
for i=1:7
    for j=1:4
        Q(i,j)=0;
    end
end

% matriz Ix7x7 (I)
for i=1:7
    for j=1:4
        I(i,j)=0;
    end
end
for i=1:7
    for j=i
        I(i,j)=1;
    end
end

A = [S, I; -Minv*K, -Minv*B];

B = [S, Q, Q; Minv*E, Minv*Kp, Minv*Bp];

C = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; %vetor de saídas (z, no
caso)

D = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]; %vetor de entradas

%Mudança para Função de Transferência: (para inserir entradas ao sistema
pelo Simulink)

[numerador,denominador] = ss2tf(A,B,C,D,4); %calcula H(s) (para a entrada
Fdd);
bode(numerador,denominador); %Diagrama de Bode
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

As Figuras 4.7 a 4.9 mostram os gráficos dos resultados das simulações para a entrada em Z_{0l} (roda dianteira) e a saída em z (deslocamento vertical do centro de massa).

Todas as entradas têm amplitude de 10 mm. No impulso, a tempo inicial é de 0s e o tempo final é de 0,01s. No degrau o tempo inicial é de 0s. Na senóide, a frequência é de 3 Hz e a defasagem é de 0°. As Figuras 4.10 a 4.11 mostram os gráficos dos resultados das simulações para a entrada em Z_{0l} (roda dianteira) e a saída em θ (ângulo do veículo relação ao solo). Todas as entradas têm amplitude de 10 mm. No impulso, a tempo inicial é de 0s e o tempo final é de 0,01s. No degrau o tempo inicial é de 0s. Na senóide, a frequência é de 3 Hz e a defasagem é de 0°.

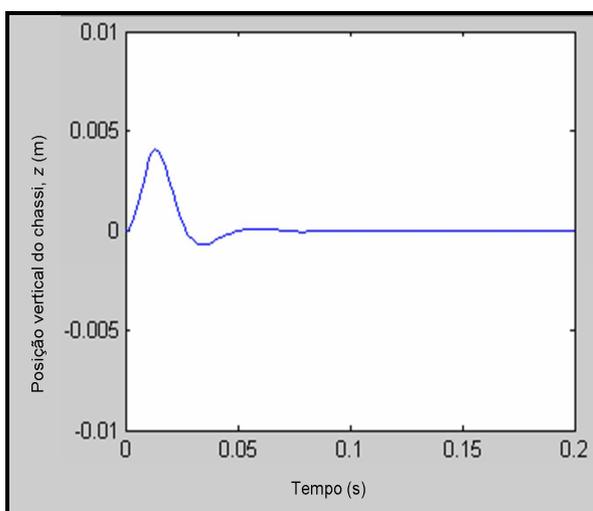


Figura 4.7: Impulso (em Z_{0l}) – $z(m)$ x $t(s)$.

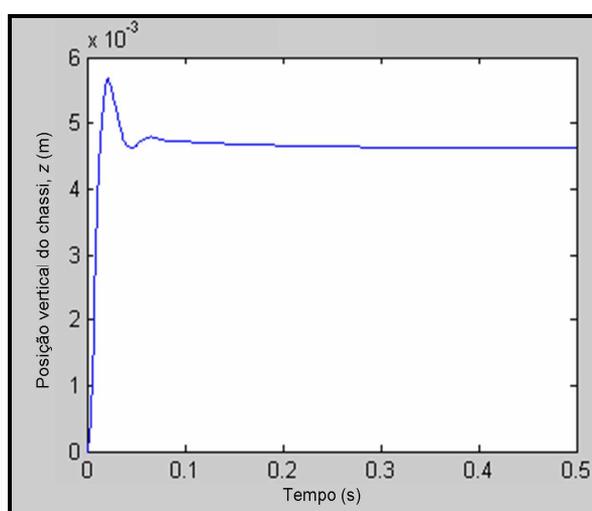


Figura 4.8: Degrâu (em Z_{0l}) – $z(m)$ x $t(s)$.

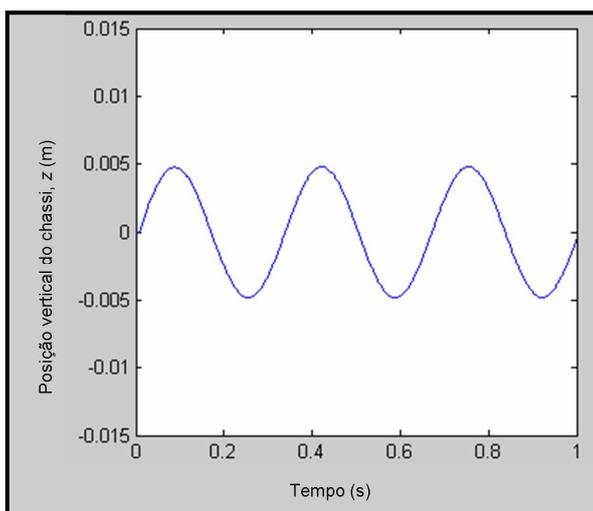


Figura 4.9: Senóide (em Z_{0l}) – $z(m)$ x $t(s)$.

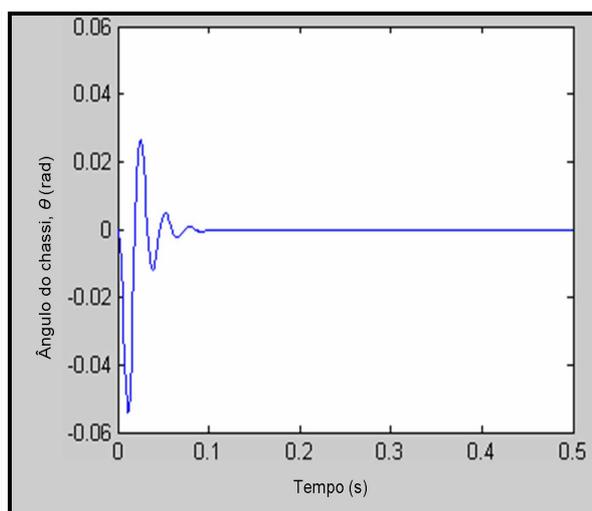


Figura 4.10: Impulso (em Z_{0l}) – $\theta(rad)$ x $t(s)$.

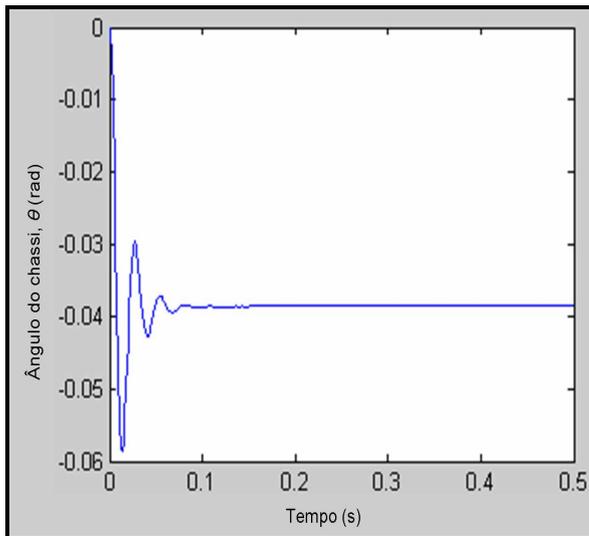


Figura 4.11: Degrau (em Z_{01}) – $\theta(\text{rad}) \times t(\text{s})$.

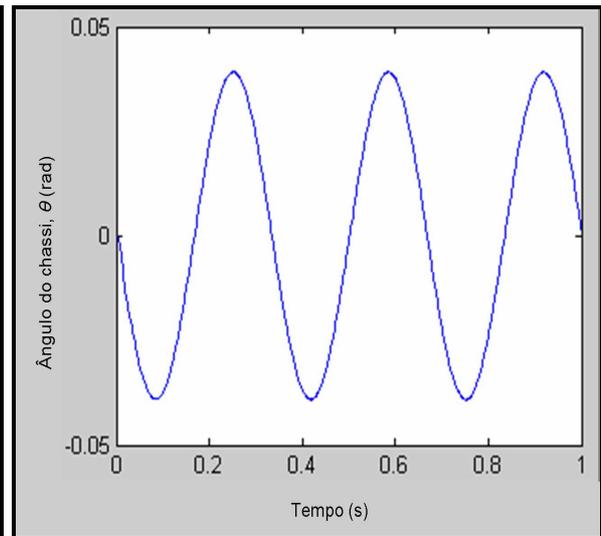


Figura 4.12: Senóide (em Z_{01}) – $\theta(\text{rad}) \times t(\text{s})$.

As Figuras 4.13 a 4.15 mostram os gráficos dos resultados das simulações para a entrada em Z_{02} (roda traseira) e a saída em z (deslocamento vertical do centro de massa). Todas as entradas têm amplitude de 10 mm. No impulso, a tempo inicial é de 0s e o tempo final é de 0,01s. No degrau o tempo inicial é de 0s. Na senoide, a frequência é de 3 Hz e a defasagem é de 0° . As Figuras 4.16 a 4.18 mostram os gráficos dos resultados das simulações para a entrada em Z_{02} (roda traseira) e a saída em θ (ângulo do veículo relação ao solo). Todas as entradas têm amplitude de 10 mm. No impulso, a tempo inicial é de 0s e o tempo final é de 0,01s. No degrau o tempo inicial é de 0s. Na senoide, a frequência é de 3 Hz e a defasagem é de 0° .

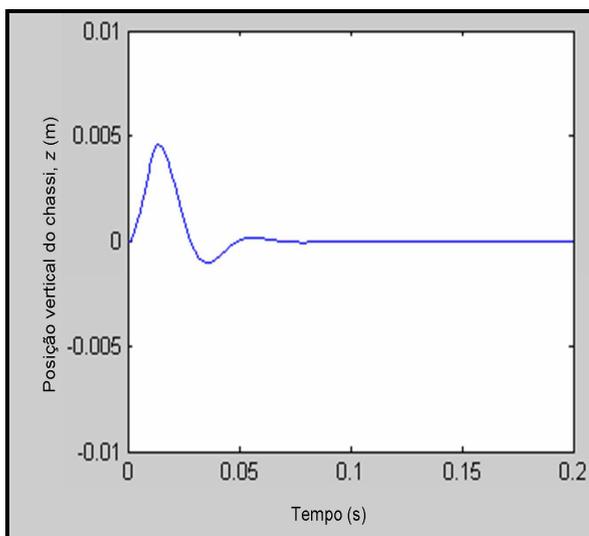


Figura 4.13: Impulso (em Z_{02}) – $z(\text{m}) \times t(\text{s})$.

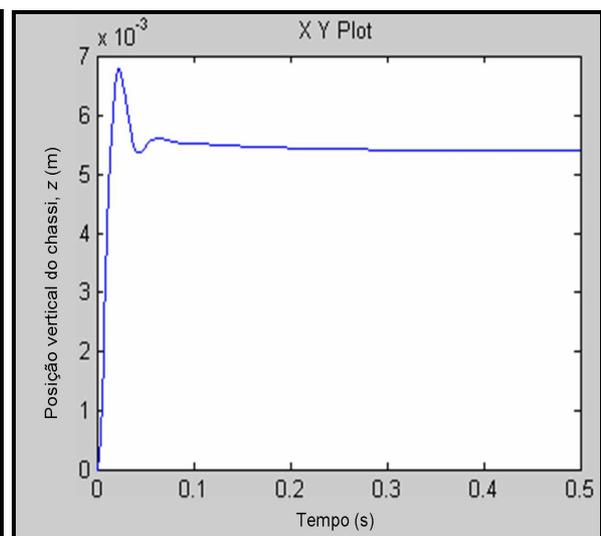


Figura 4.14: Degrau (em Z_{02}) – $z(\text{m}) \times t(\text{s})$.

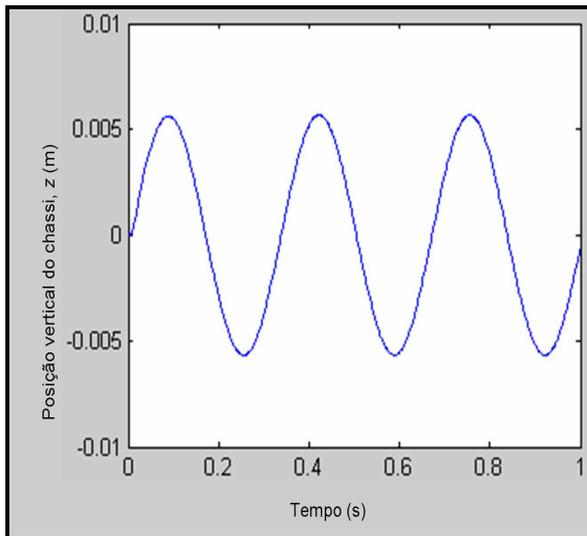


Figura 4.15: Senóide (em Z_{02}) – $z(m)$ x $t(s)$.

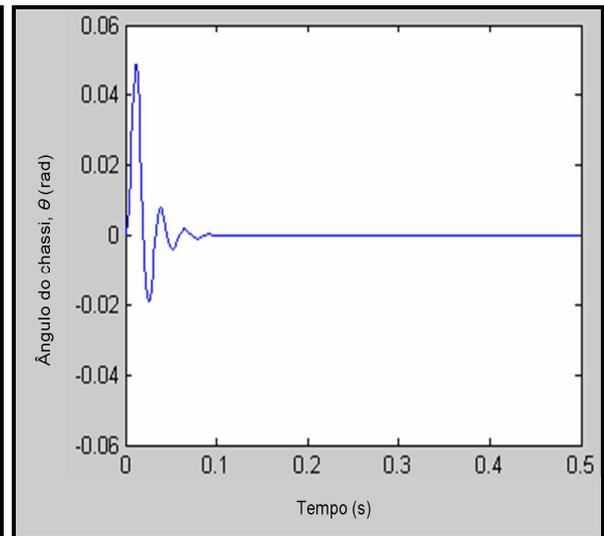


Figura 4.16: Impulso (em Z_{02}) – $\theta(rad)$ x $t(s)$.

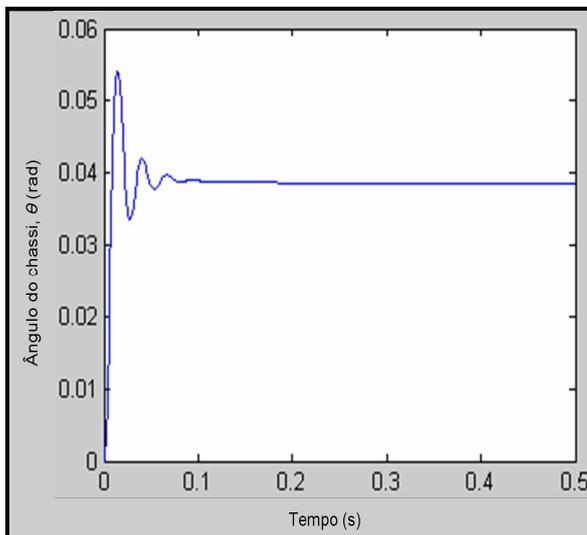


Figura 4.17: Degrau (em Z_{02}) – $\theta(rad)$ x $t(s)$.

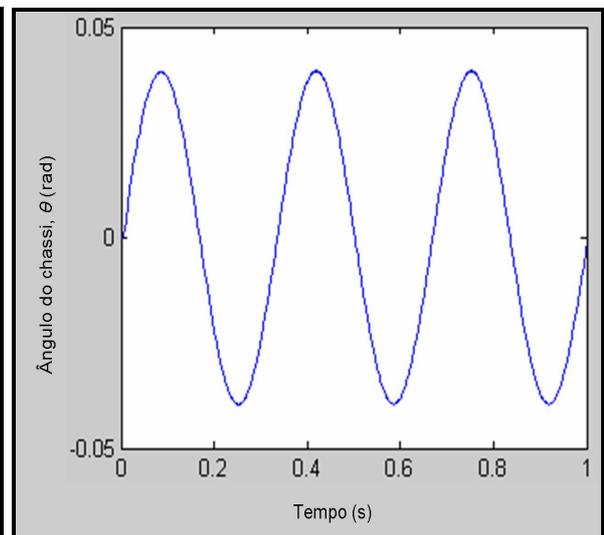


Figura 4.18: Senóide (em Z_{02}) – $\theta(rad)$ x $t(s)$.

A Figura 4.19 mostra o Diagrama de Bode do modelo físico plano em questão para entrada em Z_{01} (roda dianteira) e a saída em z . No primeiro gráfico, pode-se observar o ganho do sistema em relação às frequências das excitações de base e no diagrama de fases, observa-se o ângulo de fase do sistema para cada frequência de excitação de base. Em seguida, a Figura 4.20 mostra o Diagrama de Bode para entrada em Z_{01} (roda dianteira) e a saída em θ . Nesta situação pode-se observar que em frequências próximas a 200 rad/s (31,8 Hz) há um ganho que chega a aproximadamente 10 dB no ângulo que o chassi faz com o terreno.

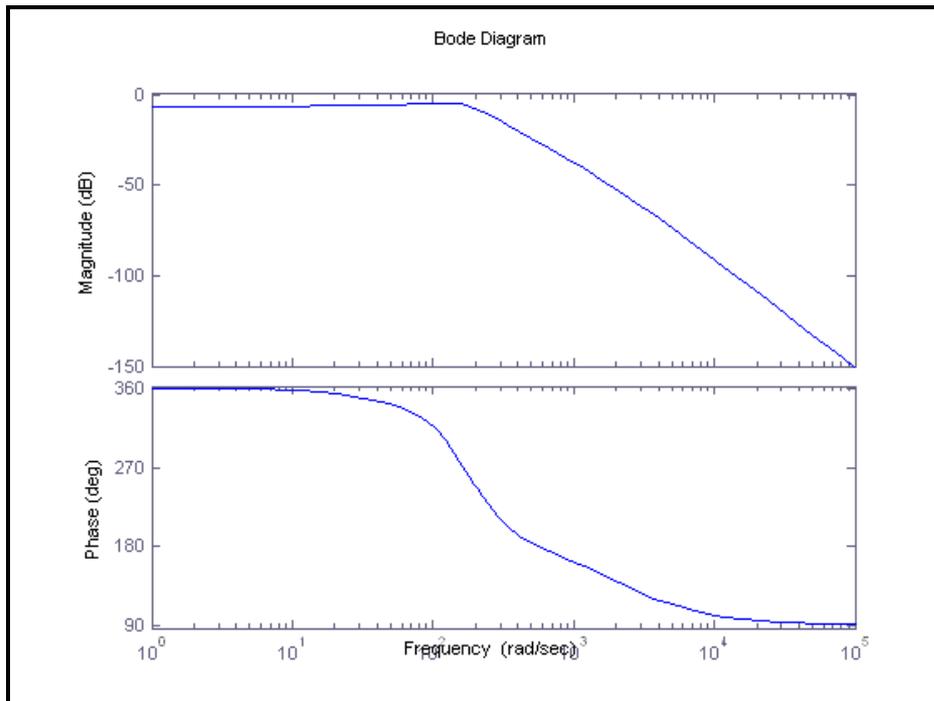


Figura 4.19: Diagrama de Bode para entrada em Z_{01} e saída em z .

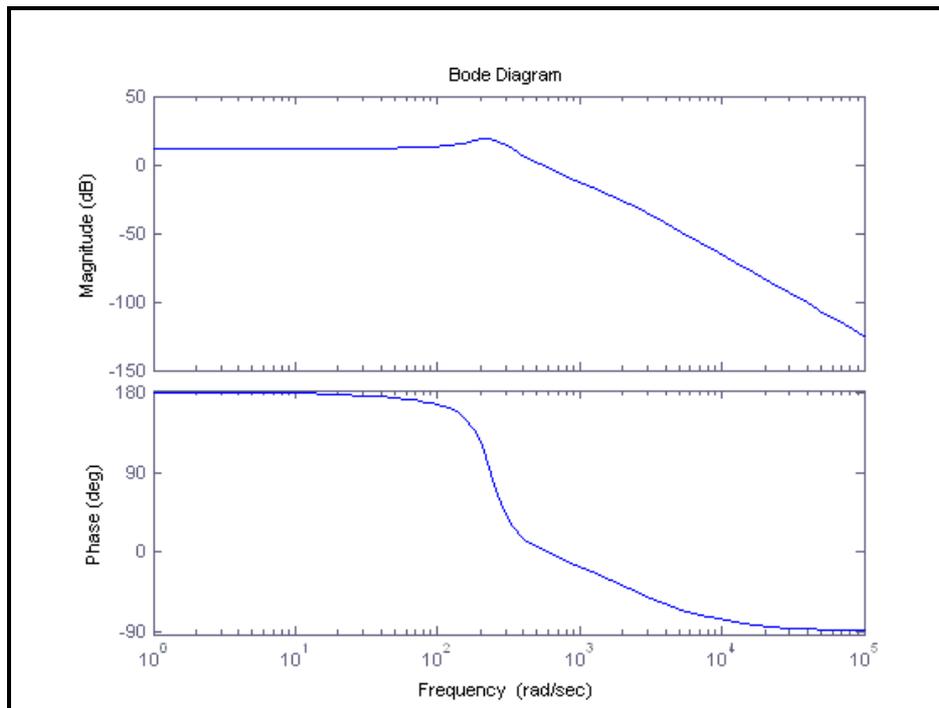


Figura 4.20: Diagrama de Bode para entrada em Z_{01} e saída em θ .

Usando a função *ss2zp* do *MatLab*, foram encontrados os pólos do sistema. A partir dos pólos, foram achadas as frequências naturais do sistema em cada modo de vibração. A frequência do pólo mais lento (primeira frequência) encontrada foi 162 rad/s (25,8 Hz), o que condiz com o valor encontrado no Diagrama de Bode.

Também foram realizadas simulações usando o modelo físico tridimensional. Porém, neste caso, foram analisadas as respostas das variáveis z e z_{DD} (posição vertical do centro de massa do chassi e da roda dianteira direita) para diferentes tipos de entradas em F_{DD} (força na roda dianteira direita). As Figuras 4.21 a 4.24 mostram a resposta no tempo para entradas em impulso e degrau nas saídas escolhidas (z – Figuras 4.21 e 4.23 - e z_{DD} - Figuras 4.22 e 4.24 -). O impulso tem amplitude de 10 N e duração de 0,01 s, enquanto que o degrau tem amplitude de 10 N e começa em 0 s. As Figuras 4.25 e 4.26 mostram a resposta à frequência do sistema para as duas entradas escolhidas (z e z_{DD} , respectivamente) a partir do Diagrama de Bode.

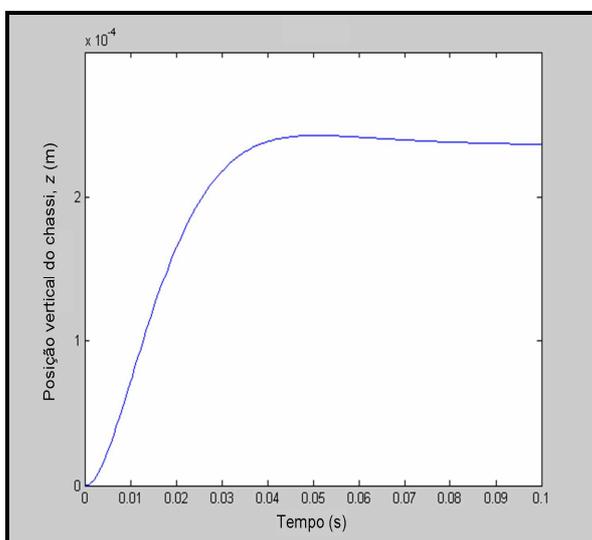


Figura 4.21: Degrau (em F_{DD}) – $z(m)$ x $t(s)$.

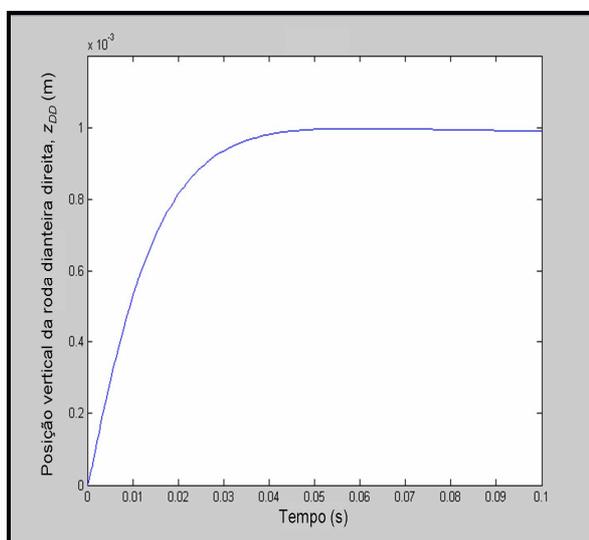


Figura 4.22: Degrau (em F_{DD}) – $z_{DD}(m)$ x $t(s)$.

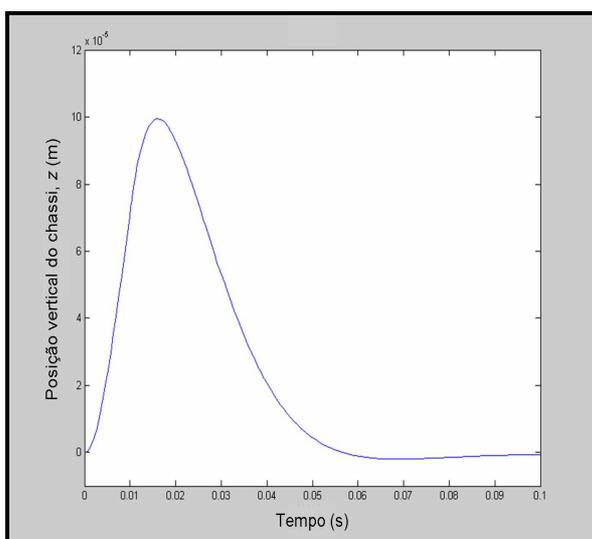


Figura 4.23: Impulso (em F_{DD}) – $z(m)$ x $t(s)$.

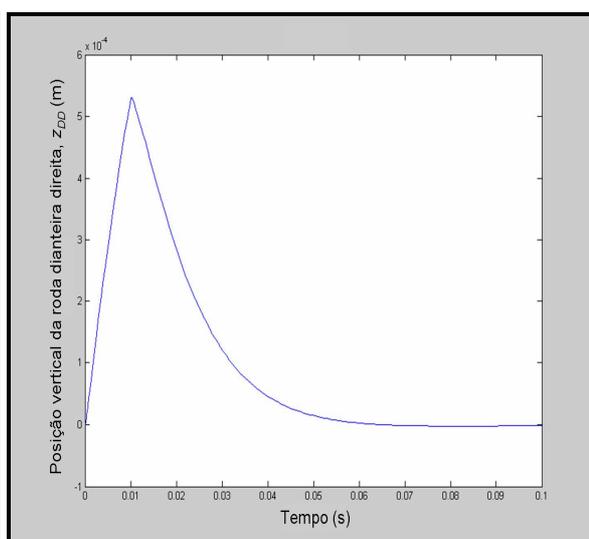


Figura 4.24: Impulso (em F_{DD}) – $z_{DD}(m)$ x $t(s)$.

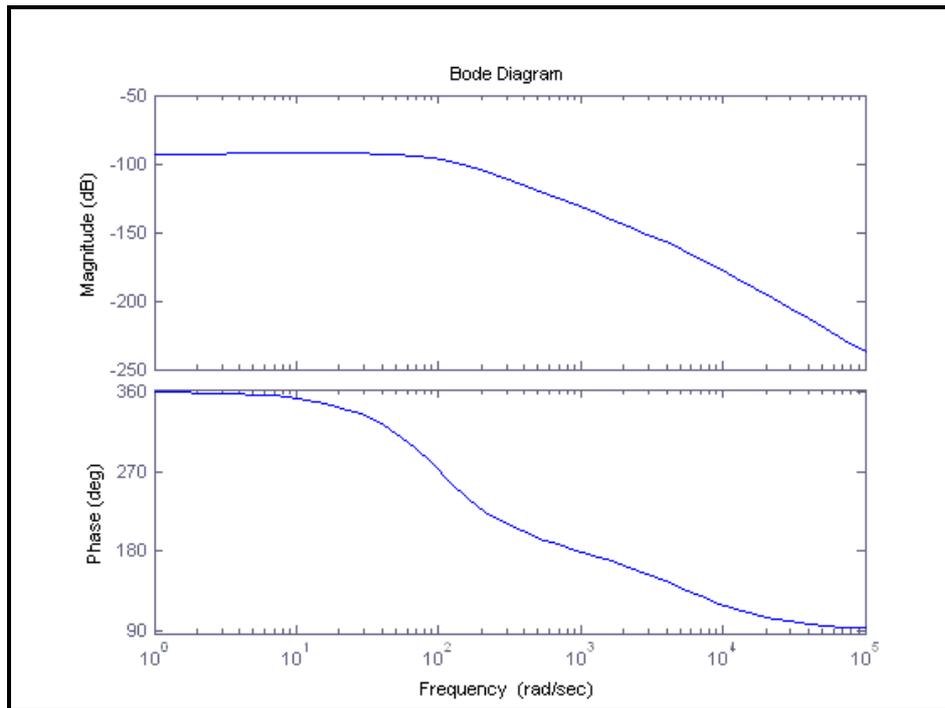


Figura 4.25: Diagrama de Bode para entrada em F_{DD} e saída em z .

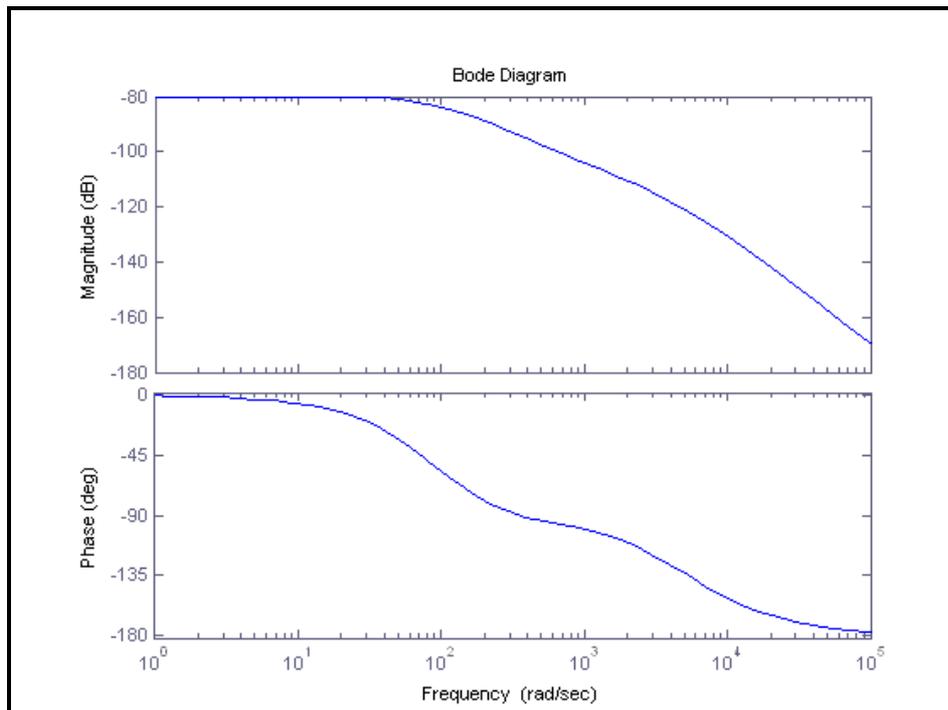


Figura 4.26: Diagrama de Bode para entrada em F_{DD} e saída em z_{DD} .

5 Simulações em *CosmosMotion*

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os modelos tridimensionais em *SolidWorks* usados para realizar as simulações no *CosmosMotion*. Serão mostrados os resultados das simulações para diversas entradas e saídas analisadas e os procedimentos para a realização das mesmas.

5.2 MODELOS USADOS

Nesta seção serão revistos os modelos tridimensionais modelados em ambiente virtual já apresentados na seção que trata do projeto de ambos os simuladores (Capítulo 3, Seção 2), porém, nesta seção serão introduzidas explicações a respeito do método usado e da escolha das entradas.

5.2.1 Plataforma Stewart

Os modelos usados da Plataforma Stewart apresentam-se na Figura 5.1. Nestes modelos, podem-se observar (em azul) os pontos de aplicação das forças na simulação e o sentido das mesmas. Foi feito um modelo que conta com um bloco que gera uma carga no topo da Plataforma. Este bloco representa a carga de um veículo em escala usado em simulações.

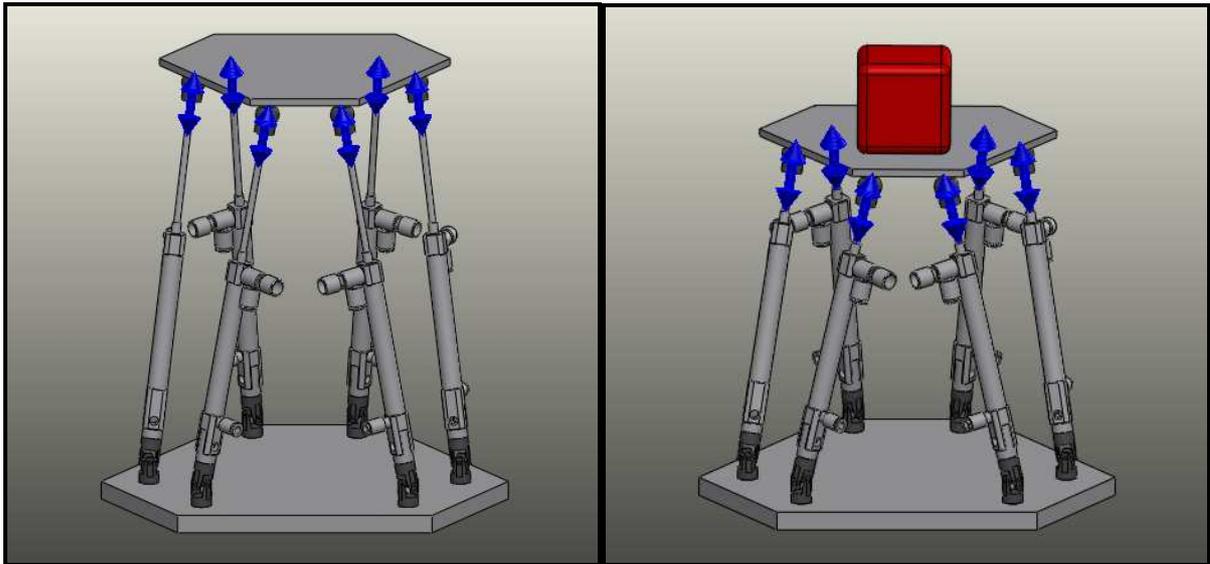


Figura 5.1: Plataforma com (esquerda) e sem carga (direita).

5.2.2 Simulador Vertical

O modelo tridimensional do veículo em escala estudado apresenta-se na Figura 5.2. Neste modelo é dada ênfase ao sistema de suspensão (Figura 5.3). A massa dos outros sistemas do veículo (motor e sistema de transmissão, entre outros) foi aplicada ao longo do chassi do veículo (em azul).

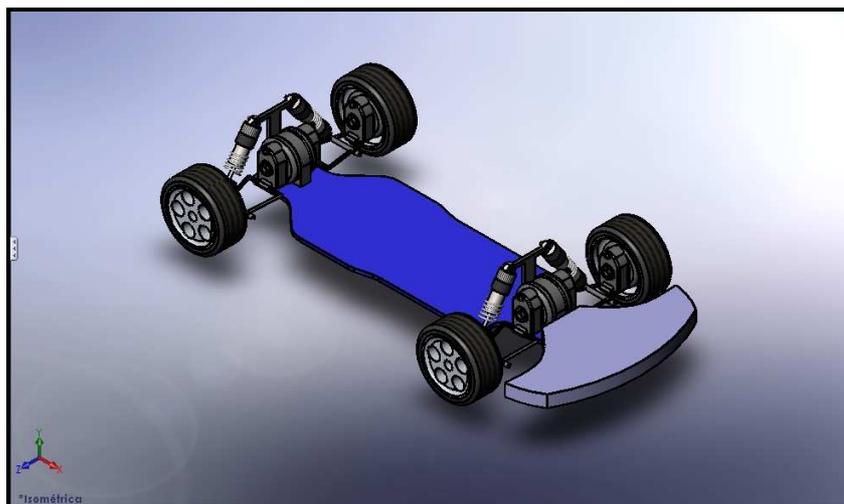


Figura 5.2: Desenho do veículo em escala.

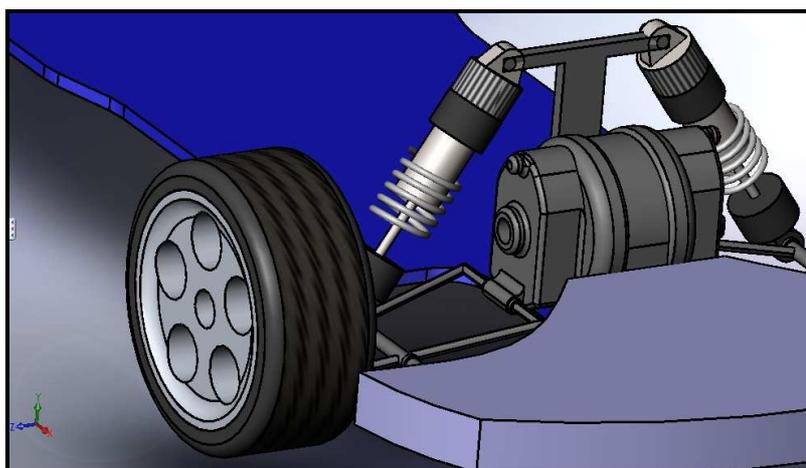


Figura 5.3: Sistema de suspensão.

As simulações servirão para análise da resposta do veículo às excitações de base. Logo, na simulação, serão aplicadas forças nas quatro rodas do veículo, para simular diversas situações, tais como a passagem sobre um quebra-molas ou a passagem em um terreno irregular.

Para realizar as simulações, são colocadas as forças relacionadas às excitações de base em cada pneu do veículo (Figura 5.4).

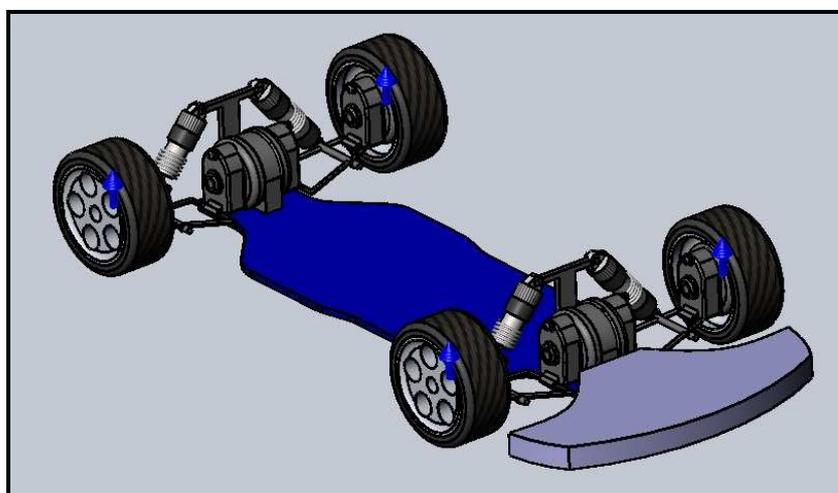


Figura 5.4: Forças aplicadas na simulação.

5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos com as simulações explanadas na seção anterior.

5.3.1 Plataforma Stewart

Foram feitas duas simulações para poder comparar o tempo de resposta da Plataforma ao comando de elevação com ou sem carga. Os resultados se encontram nas Figuras 5.5 e 5.6, respectivamente. Pode-se observar nos gráficos da resposta no tempo obtidos que o sistema fica muito mais lento quando há cargas aplicadas no topo da Plataforma Stewart. Isto porque, com pressão e vazão constantes, a força resultante de elevação da placa de topo diminui com o aumento da carga, tornando a movimentação da Plataforma mais lenta. O aumento da carga também aumenta a região de instabilidade da Plataforma assim, para cargas maiores, os limites máximos para os deslocamentos lineares e angulares devem ser estreitados.

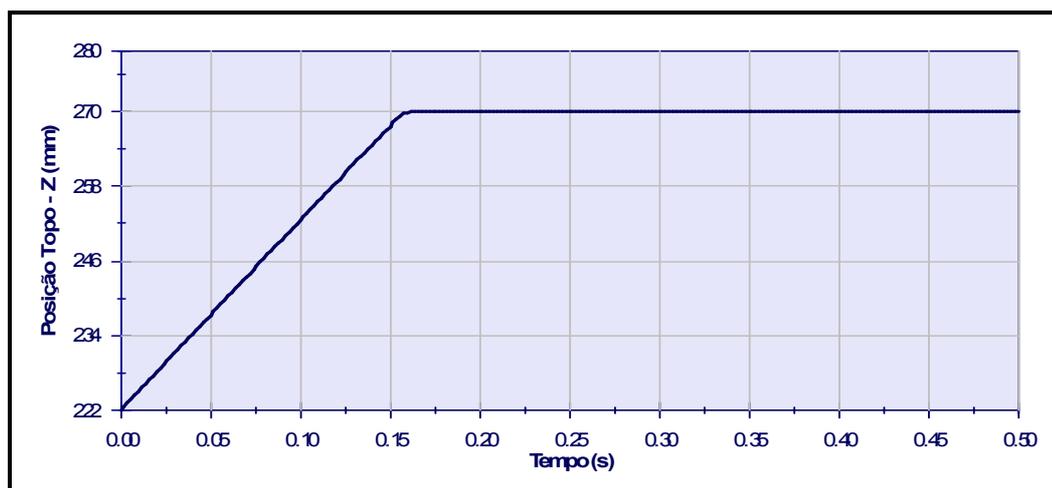


Figura 5.5: Resposta no tempo para a elevação da Plataforma Stewart sem carga.

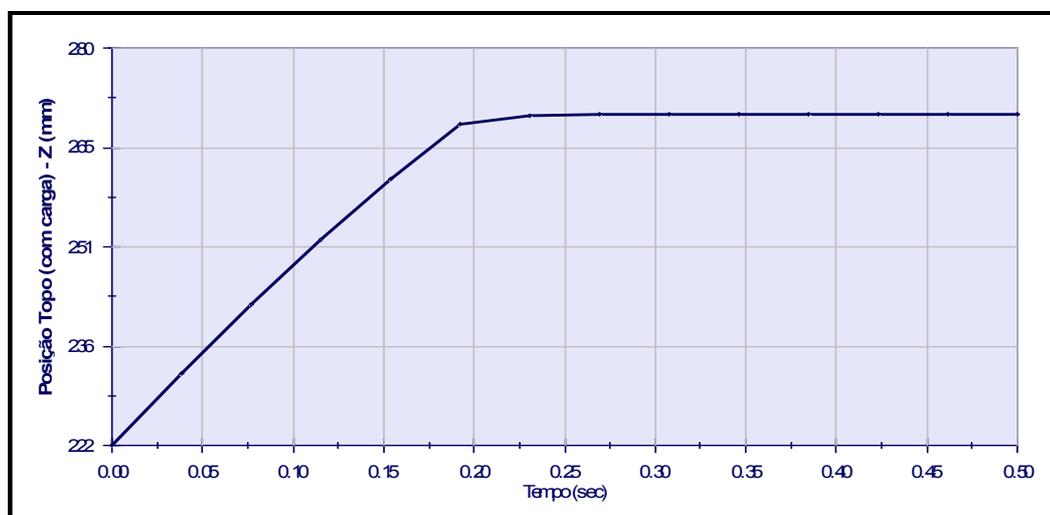


Figura 5.6: Resposta no tempo para a elevação da Plataforma Stewart com carga.

5.3.2 Simulador Vertical

A primeira simulação realizada foi feita para uma entrada de força senoidal de amplitude 5 N e frequência de 3 Hz. A saída escolhida foi o deslocamento vertical da roda dianteira direita (Figura 5.7).

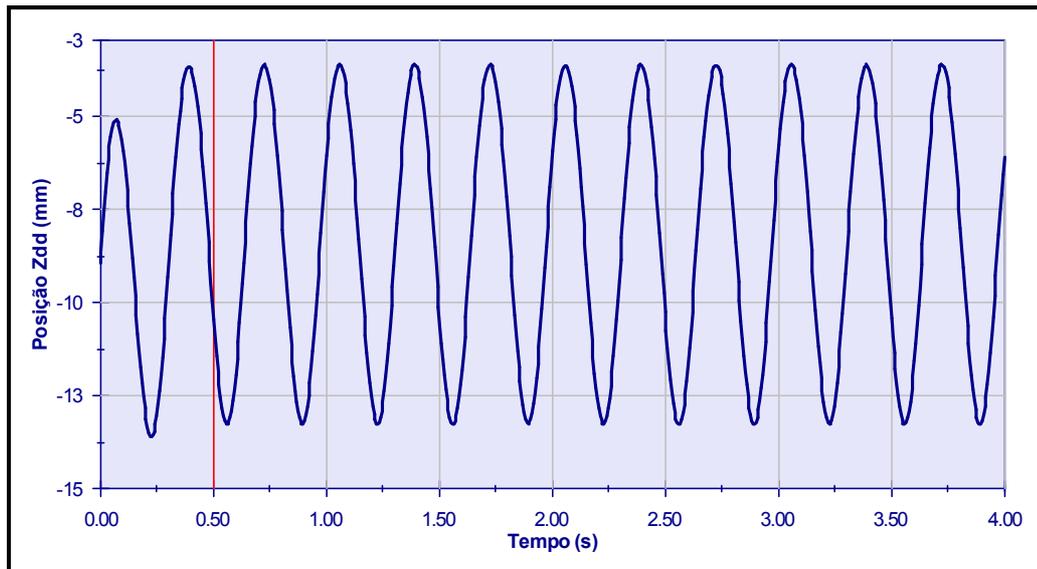


Figura 5.7: Deslocamento vertical da roda dianteira direita no tempo - Senóide.

Em seguida, foi feita uma simulação com a mesma saída e usando como entrada, um degrau com rampa de força de 0 N em 0s até 0,5 N em 1s (Figura 5.8).

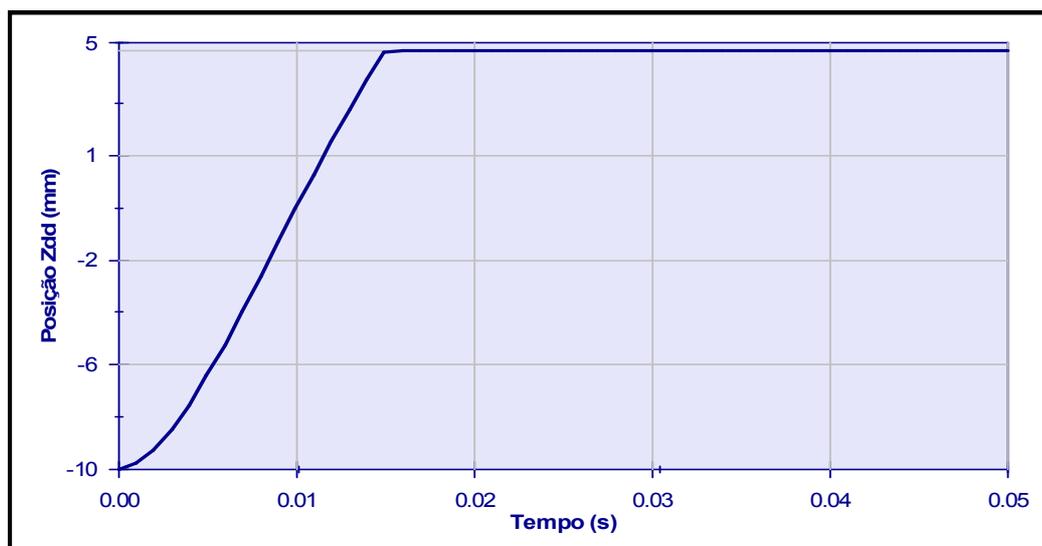


Figura 5.8: Deslocamento vertical da roda dianteira direita no tempo - Degrau.

6 Comparação e análise dos resultados

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão comparados quantitativamente os valores encontrados para mesmas entradas e saídas usando a simulação no *MatLab* e no *CosmosMotion* e qualitativamente, estes serão comparados com o resultado da aplicação destas entradas (excitações de base) nas plataformas construídas.

6.2 PLATAFORMA STEWART

Usando os programas citados na Seção 3.4.1 foi realizado um teste de movimentação da Plataforma Stewart sem carga. Como se pode ver nas simulações, o comportamento da Plataforma com carga se diferencia do comportamento da mesma quando esta está descarregada, isto porque, com pressão e vazão de ar constantes (por causa dos reguladores), a força aplicada sobre a Plataforma torna a resposta do sistema mais lenta e também aumenta sua instabilidade.

Deve-se lembrar que as constantes de tempo que podem ser retiradas dos resultados apresentados não têm um valor absoluto no sistema. Isto porque a pressão e vazão ajustada influenciam drasticamente no tempo de resposta dos atuadores da Plataforma Stewart, portanto apenas devem-se comparar os resultados obtidos para mesmos ajustes de vazão e pressão do sistema. Na simulação isto é feito mudando as forças aplicadas ao cilindro e os coeficientes de amortecimento no cilindro dos atuadores.

6.3 SIMULADOR VERTICAL

Com o intuito de verificar o resultado das simulações, foram feitos experimentos com o Simulador Vertical. O veículo em questão (que foi usado como modelo para a

simulação) foi acoplado ao Simulador Vertical (Figura 6.1). Esta bancada tem como função, aplicar as forças anteriormente simuladas à roda, para que, a partir dos dados coletados da resposta do sistema, possa-se compará-los com os dados obtidos na simulação computacional.

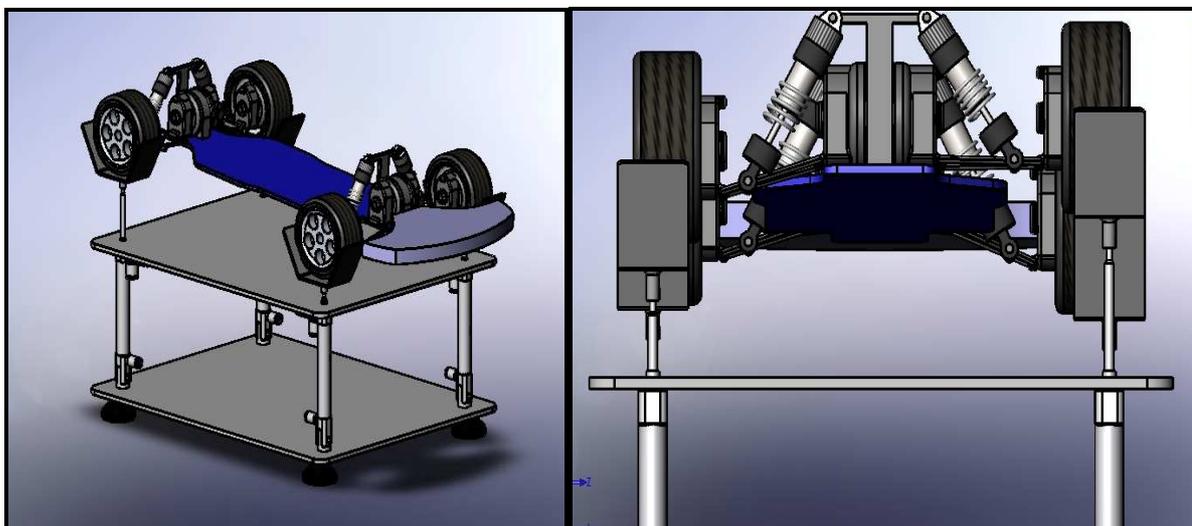


Figura 6.1: Desenho da bancada de teste (à esquerda) e detalhe (à direita).

Na bancada real, pôde-se analisar o comportamento do veículo para três diferentes tipos de entradas. No primeiro teste, é testado o comportamento de arfagem do veículo em resposta à frequência de excitação. No segundo e no terceiro, são observadas a rolagem e a torção do chassi. Para executar estes testes foram usados os programas descritos na Seção 3.4.2. Não foi possível observar as ressonâncias nos testes, pois estas estão em frequências muito elevadas. Alguns ajustes no equipamento devem ser feitos a fim de se conseguir alcançar tais frequências.

Comparando o comportamento do veículo quando sujeito a excitações em frequências diferentes, os resultados observados no experimento e na simulação são muito semelhantes, sempre lembrando que apenas é possível fazer uma análise qualitativa neste ponto do projeto. Apenas com a devida instrumentação poderão ser obtidos resultados quantitativos.

7 Conclusões

Este trabalho gerou diversos equipamentos que podem ser usados para fins acadêmicos, para testes e experimentos. Entre estes estão a bancada de teste do sistema de atuadores pneumáticos controlados por válvulas solenóides (Figura 7.1), protótipo da plataforma em madeira e PVC movida manualmente (Figura 3.2), uma Plataforma Stewart em escala (Figura 7.2) e um Simulador Vertical, que pode ser usada na análise de suspensões em carros em escala (1:8, no caso; Figura 7.3). Todos estes se encontram no Laboratório de Controle e Automação (LCA).

Com relação aos resultados das simulações, foi possível analisar qualitativamente o comportamento dos simuladores através de comparação visual com os experimentos realizados nos simuladores. Foi possível prever a influência da carga na Plataforma Stewart e a resposta esperada do veículo em escala no Simulador Vertical, além de determinar os deslocamentos e ângulos esperados para diversas entradas e saídas do veículo em escala, para que estes possam ser comparados com os valores obtidos com o Simulador instrumentado em trabalhos futuros.



Figura 7.1: Bancada de testes do sistema de atuadores pneumáticos [8].

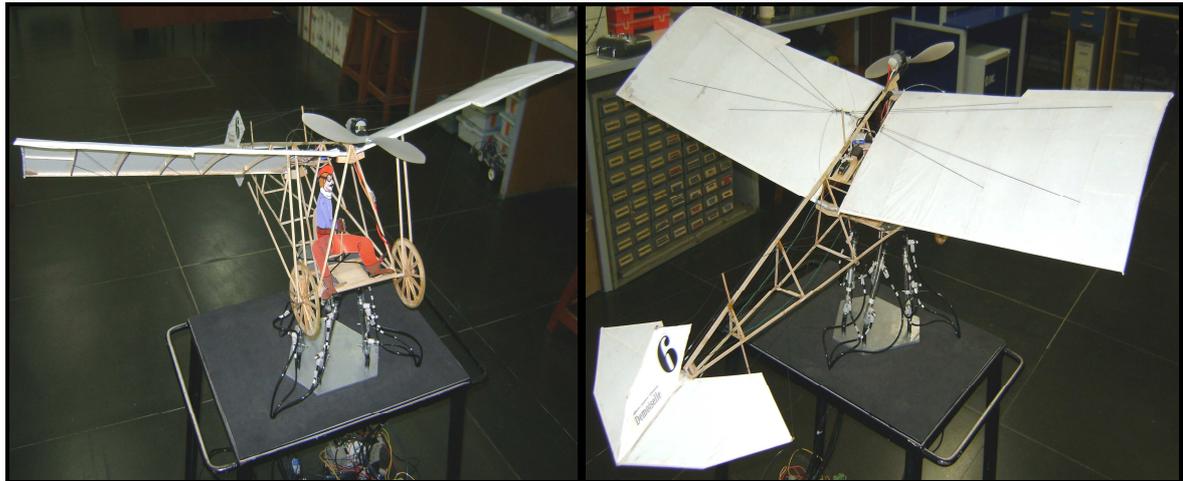


Figura 7.2: Plataforma Stewart construída com aeromodelo em escala.



Figura 7.3: Simulador Vertical construído.

Os simuladores construídos ainda precisam ser instrumentados, ou seja, ainda devem ser acoplados os sensores que realizarão a medição das variáveis estudadas. Este sensor pode ser um medidor de deslocamento linear (LVDT – Figura 7.4), por exemplo, ou então um acelerômetro.

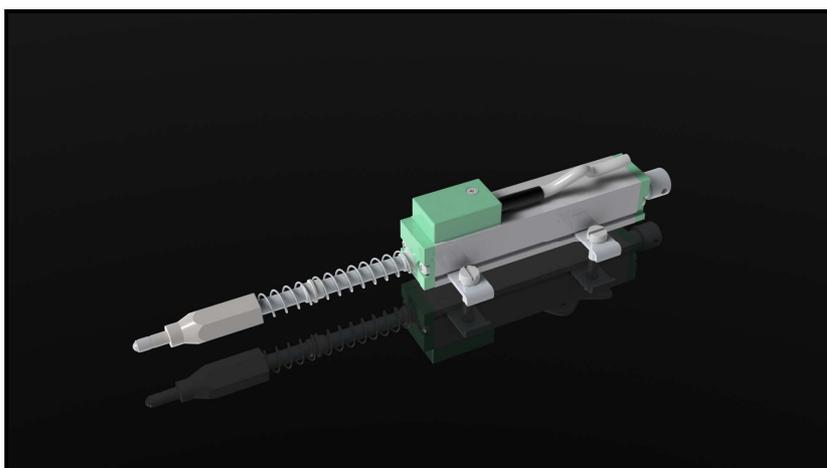


Figura 7.4: Sugestão de LVDT.

A Figura 7.5 mostra um esquema mais detalhado da malha de controle a ser feita. Em um primeiro estágio, não haverá o transdutor acoplado ao veículo, apenas o acoplado à bancada, ou seja, apenas a bancada de testes será instrumentada. Este transdutor servirá para fechar a malha de controle apenas da bancada, ou seja, para poder exercer controle sobre os valores desejados dos deslocamentos dos atuadores, que serão na simulação e teste com o Simulador Vertical, por exemplo, as excitações de base sofridas pelo veículo. Posteriormente, poderão ser acoplados diversos sensores no veículo testado, a fim de se medir diferentes grandezas, tais como o deslocamento da mola da suspensão ou a tensão aplicada em certo ponto do chassi.

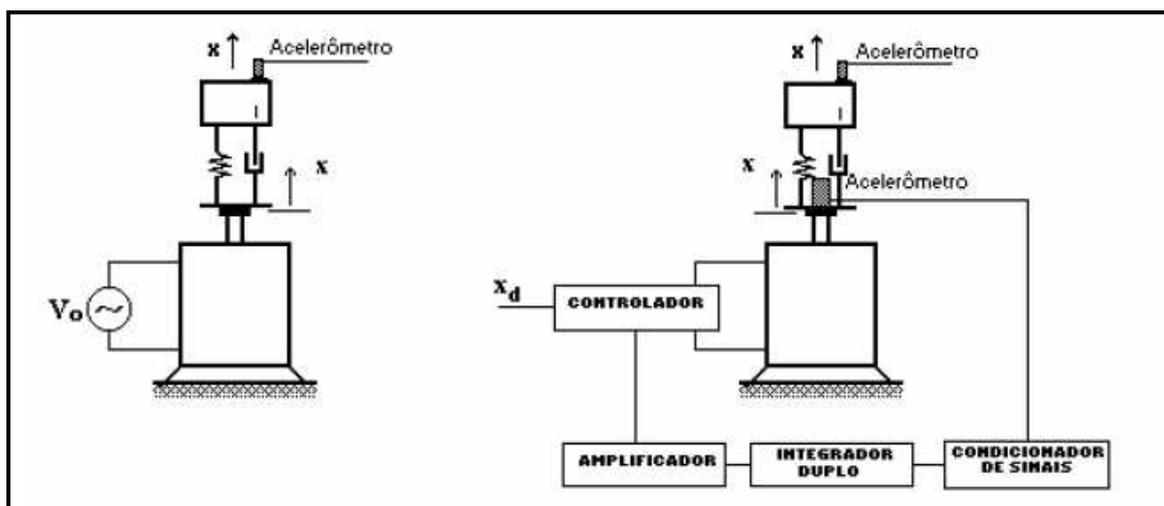


Figura 7.5: Instrumentação em cada atuador da bancada de teste [1].

REFERÊNCIAS

- 1 - SPERANZA NETO, M. **Controle de sistemas dinâmicos**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. Junho de 1998.
- 2 - SPERANZA NETO, M. e DA SILVA, F. R. **Modelagem e análise de sistemas dinâmicos**. Julho de 2005.
- 3 - LLERENA, R. W. A. **Modelagem para um simulador de movimentos para um veículo terrestre em escala**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. Dissertação de Mestrado. Orientador: SPERANZA NETO, M. Fevereiro de 2000.
- 4 - LEBRET, G.; LIU, K. e LEWIS, F. L. **Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator**. J.Robot. Syst., vol. 10, no. 5, pp.629–655, 1993.
- 5 - SPERANZA NETO, M. **Dinâmica de um corpo rígido no espaço representada através do fluxo de potência**. 2009.
- 6 - Chin-I HUANG, Chih-Fu CHANG, Ming-Yi YU e Li-Chen FU. **Sliding-mode tracking control of the Stewart Platform**. Department of Electrical Engineering and Department of Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C.
- 7 - TAPIA, Benjamín Cortés e MÉNDEZ, Sergio Javier Torres. **Robot paralelo planar para ensamble**. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Puebla, Maravillas, Col.
- 8 - ALBUQUERQUE, A. N.; MEGGIOLARO, M. A.; SPERANZA NETO., M. **Desenvolvimento de um simulador vertical com atuação pneumática**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. Seminário de Iniciação Científica. Agosto de 2008.
- 9 - VEX Robotics Inventor's Guide. Innovation One, Inc. TX, USA. 11/04.
- 10 - NELLI SILVA, Emílio Carlos. **Apostila de pneumática – sistemas fluido mecânicos**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002.
- 11 - BERTOTTI, Fabio L. **Apostila LVDT – Linear Variable Differential Transformer**. Laboratório BIOTA.