

# **SIMULADOR DE DIREÇÃO COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE**

Denver Marchese Orsolin - dnvr.m.o@gmail.com

Eduardo R. Rampelotto - er.rampelotto@gmail.com

## **RESUMO**

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um simulador de direção com três graus de liberdades. Tal equipamento é bastante utilizado na indústria de entretenimento, treinamento de pilotos, pesquisa, educação e segurança no trânsito. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento do *cockpit*, interface de controle e mecanismos.

Palavras-chave: Simulador, Direção, Entretenimento, Controle, Realidade virtual.

## ***ABSTRACT***

*This article presents the design of a driving simulator with three degrees of freedom. This kind of equipment is widely used in the entertainment industry, racers training, research projects, education and traffic safety improvement. This project shows a more detailed explanation regarding the development of cockpit, its control interface and mechanisms.*

*Keywords: Simulator, Drive, Entertainment, Control, Virtual reality.*

# 1. INTRODUÇÃO

Simuladores de direção de alto desempenho e fidelidade proporcionam ao usuário uma real sensação de estar dirigindo um veículo autêntico. Tal efeito possui várias aplicações, como por exemplo, em pesquisas que envolvem o estudo dos reflexos e reações humanas em várias situações de risco ao dirigir um veículo.

Utilizando um simulador, foi constatado pelos pesquisadores Snowden et al. (1998) que a mudança de contraste proporcionada pela incidência de neblina é interpretada pelo cérebro como uma mudança de velocidade, dando a sensação de estar dirigindo a uma velocidade menor. Estudos como este são de extrema importância no desenvolvimento de novos dispositivos de segurança.

Com o surgimento de novas tecnologias, a indústria de entretenimento também vem apostando em realidade virtual, desenvolvendo equipamentos que permitem cada vez mais, a imersão do usuário no mundo virtual. Uma das grandes diferenças entre esses simuladores e os utilizados em treinamentos e estudos, é a fidelidade dos movimentos. Enquanto os simuladores de treinamento precisam se aproximar ao máximo de um veículo real, os de entretenimento precisam apenas dar uma idéia do movimento.

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um simulador de direção voltado para a área de entretenimento com três graus de liberdade, os quais permitem dois movimentos rotacionais e um translacional. Isso permite sentir as sensações de aceleração, frenagem, curvas e desníveis na pista.

Este trabalho aborda o desenvolvimento do *cockpit*, controle, comunicação do simulador de direção e mecanismos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Força e Movimentos

#### 2.1.1. Sistemas de referência

Os sistemas de referência são utilizados para descrever posições e movimentos de objetos. O presente trabalho utilizará o sistema de referência representado na figura 1.

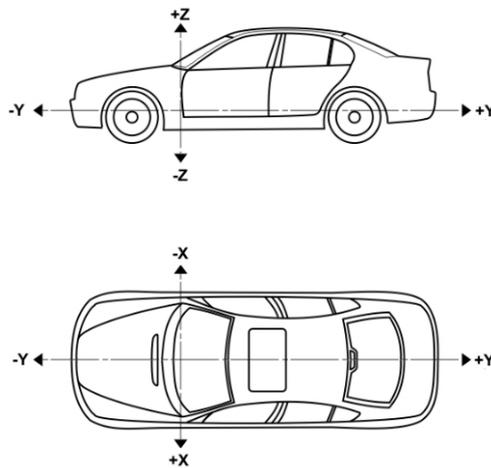


Figura 1 – Sistema de referência.

### 2.1.2. Segunda Lei de Newton

Todas as definições, experiências e observações feitas na segunda lei de Newton para o movimento, são resumidas pela Eq.1.

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} \quad \text{Eq.1}$$

Esta equação mostra que a força que atua em um corpo é igual ao produto da sua massa pela aceleração. A força é capaz de desenvolver uma aceleração alterando o estado físico de um corpo, e este adquire uma aceleração na mesma direção da força, segundo um referencial inercial.

### 2.1.3. Lei de Hooke

A lei de Hooke (Eq.2) é de extrema importância na física quando se fala em elasticidade dos corpos. É utilizada para o cálculo de deformações em corpos que são submetidos a uma força, sendo esta força equivalente ao deslocamento da mola vezes sua constante de rigidez.

$$\mathbf{F} = -k \cdot \mathbf{d} \quad \text{Eq.2}$$

O sinal negativo da equação Eq.2 significa que a força exercida pela mola tem o sentido oposto ao do deslocamento da sua extremidade livre. A constante  $k$  é chamada de constante de rigidez da mola, quanto maior o valor de  $k$  maior será a rigidez da mola, isto é, maior a força com que ela reage a um deslocamento.

### 2.1.4. Acelerações atuantes em um veículo automotivo

Ao conduzir um automóvel, o motorista está submetido a diferentes acelerações. A figura 2 mostra um veículo com velocidade constante andando em linha reta, desconsiderando pequenas oscilações, percebe-se que a única aceleração atuante é a gravidade terrestre, de aproximadamente 9,81 m/s ou 1G.

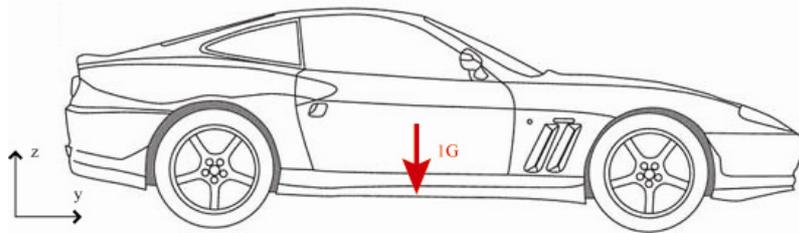


Figura 2 – Veículo com velocidade constante andando em linha reta.

Para aumentar a velocidade do carro é preciso produzir uma aceleração  $A$  na direção de  $y$ . Devido à inércia, percebe-se uma aceleração, em relação ao carro, no corpo do motorista de mesmo módulo, porém de sentido inverso. O diagrama de acelerações está representado na figura 3.

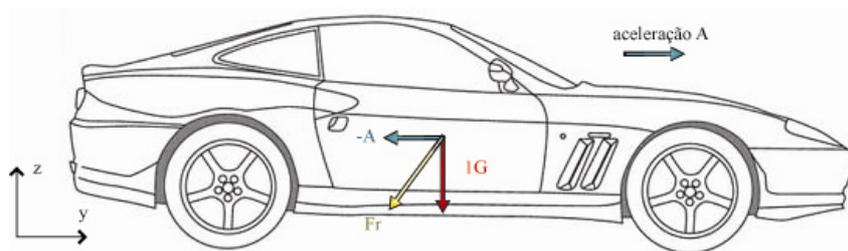


Figura 3 – Veículo com aceleração  $A$  no eixo  $y$

O vetor  $\vec{F}_r$  representa a aceleração resultante no corpo do condutor. Como o ângulo entre  $-\vec{A}$  e  $\vec{G}$  é de  $90^\circ$ , o módulo de  $\vec{F}_r$  é dado pela Eq.3:

$$|\vec{F}_r| = \sqrt{|\vec{A}| + |\vec{G}|} \quad \text{Eq.3}$$

## 2.2. Sistema vestibular

O sistema vestibular é formado por dois órgãos localizados em cada ouvido médio. Cada órgão vestibular é constituído de dois grupos de receptores: os canais semicirculares e os órgãos otólitos (utrículo e sáculo), representados na figura 4. Esses receptores possuem a

função de nos dizer a posição do corpo em relação à gravidade e sinalizar as alterações de direção e velocidade dos movimentos.

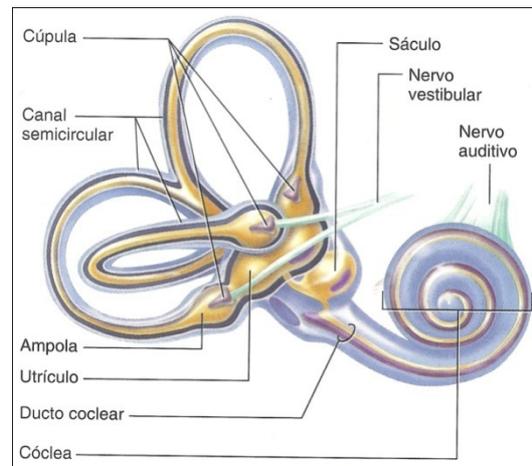


Figura 4 – Aparelho vestibular

Os canais semicirculares estão orientados em três planos diferentes: dois planos verticais perpendiculares e um horizontal, permitindo a detecção das acelerações angulares em todas as direções.

### 2.3. Motores Elétricos

São dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica. Portanto são considerados atuadores do tipo rotativo, pois a energia mecânica é fornecida através da rotação do eixo do motor.

Os motores elétricos podem ser de corrente alternada (c.a.) ou corrente contínua (c.c.). Apesar de terem um custo mais elevado, os motores c.c. podem ser controlados mais facilmente.

### 2.4. Simuladores de corrida

Os simuladores de corrida têm por objetivo prover ao usuário uma sensação real de pilotar um carro de competição. Para conseguir isso, deve ser estimulado o maior número de sentidos de forma adequada, sendo os principais a visão, a audição e o tato.

Para um envolvimento maior, é imprescindível também, a estimulação do sistema vestibular do piloto, para que o mesmo possa sentir os movimentos do carro e as forças envolvidas no ato de dirigir. Isso é conseguido movimentando o *cockpit* de forma a “inclinarem” o vetor da gravidade em relação ao veículo. Na figura 5 percebe-se como se dá o efeito da aceleração de um carro em linha reta.

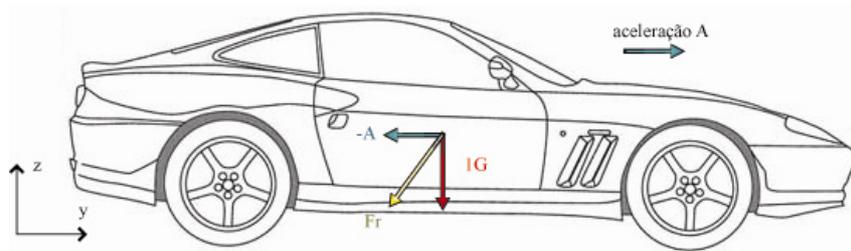


Figura 5 – Diagrama de acelerações em um veículo real

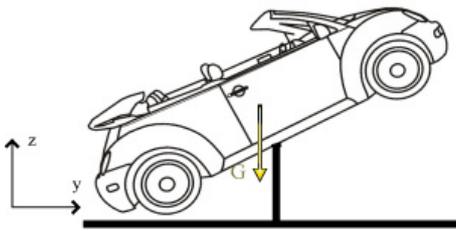


Figura 6 – Inclinação do cockpit

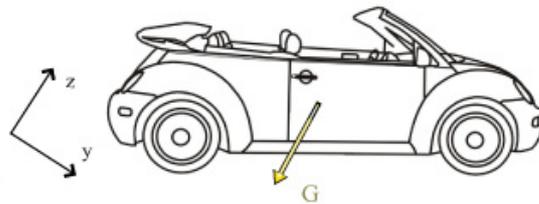


Figura 7 – Aceleração percebida pelo motorista

Ao pressionar o pedal do acelerador, o carro é acelerado em  $y+$ , e devido à inércia, o motorista percebe uma força puxando-o para  $y-$ , somando-se ao vetor da gravidade, tem-se o vetor resultante. Este vetor é recriado no *cockpit* inclinando o mesmo para trás (figura 6). Percebe-se na figura 7 que no ponto de vista do motorista, foi recriado uma aceleração de mesma inclinação que a real, porém de módulo diferente, possibilitando assim a geração das sensações de acelerações, frenagens e curvas.

### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

#### 3.1. Método de pesquisa

Natureza: foi uma pesquisa aplicada, pois objetivou a geração de conhecimento para aplicações práticas.

Forma de abordagem: pesquisa qualitativa, pois não requereu o uso de métodos e técnicas estatísticas. O processo e seu significado foram os focos principais de abordagem.

Objetivos: foi uma pesquisa explicativa visando aprofundar o conhecimento da realidade.

Procedimentos técnicos: Pesquisa experimental, o objetivo do estudo foi determinado e as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo foram selecionadas.

### 3.2. Método de trabalho

Após a definição do tema do trabalho, foi desenvolvido o projeto piloto para a construção. Logo após, foi feita uma análise da viabilidade econômica, executando adaptações na concepção quando necessário.

Com o projeto viável em mão, foi feito então a divisão em diversas tarefas menores, cada uma delas passando pelo período de execução e testes.

Ao final desta etapa, todas as tarefas foram concluídas, faltando apenas a montagem geral e execução de testes de funcionamento.

O diagrama geral do método de trabalho pode ser observado na figura 8.

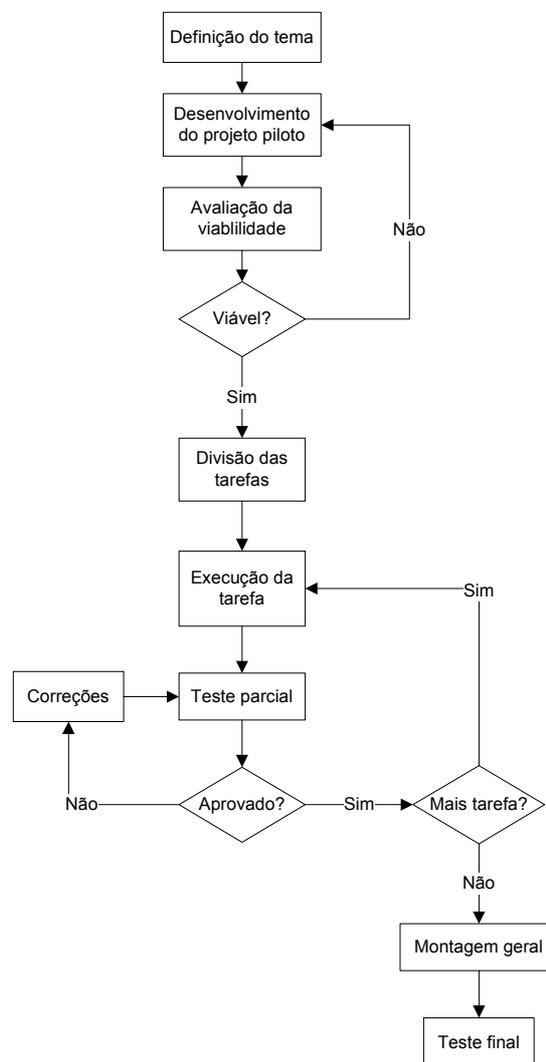


Figura 8 – Diagrama geral do método de trabalho

## 4. APLICAÇÃO PRÁTICA

### 4.1. O projeto

O projeto é composto pelo *cockpit*, representado na figura 9, e pelo sistema de movimentação (figura 10). O sistema foi todo projetado utilizando o *software Pro Engineer Wildfire 4.0*.



Figura 9 – Cockpit



Figura 10 – Sistema de movimento e estabilização do cockpit

### 4.2. Base

A base foi construída em formato retangular medindo 1m de largura por 2m de comprimento utilizando tubos circulares de metal com 38mm de diâmetros com parede de

2,5mm. A base (figura 11) possui três tubos transversais que possuem as mesmas características citadas acima, para a fixação dos dispositivos.



Figura 11 – Base do sistema.

#### 4.3. Plataforma

A plataforma foi construída conforme figura 12. Sua estrutura foi feita com chapas dobradas em U medindo 40mm de altura por 20mm de largura e espessura 1,5mm. Uma chapa de alumínio (Chapa Xadrez) de espessura 1,57mm foi fixada através rebites para formar seu piso.

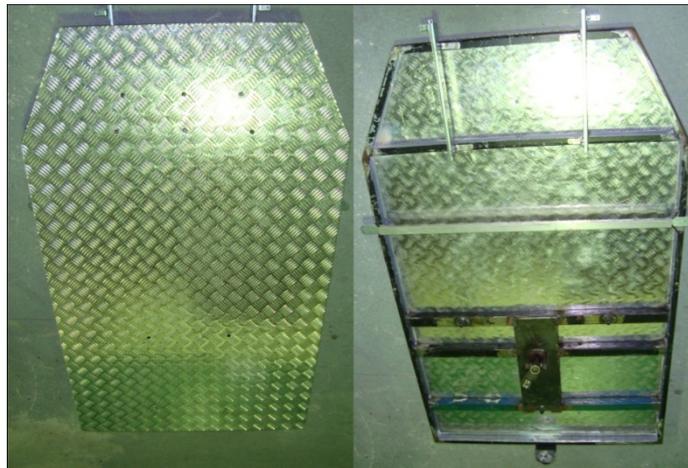


Figura 12 – Plataforma do sistema (vista superior e vista inferior).

#### 4.4. Atuadores

No desenvolvimento deste projeto foram utilizados três atuadores. Cada atuador é composto por dois motores elétricos de corrente contínua (motores de limpador de pára-brisa), cada motor possui um pinhão interligado a uma engrenagem por meio de uma corrente para transmitir o movimento. A figura 13 representa esta configuração.



Figura 13 – Atuador (Vista anterior e posterior).

As figuras 14 e 15 mostram respectivamente os parâmetros e as curvas de desempenho dos motores elétricos utilizados.

$U_N$	<b>12 V</b>
$P_N$	<b>57 W</b>
$n_N$	<b>75 rpm</b>
$I_N$	<b>18 A</b>
$I_{MÁX.}$	<b>50 A</b>
$M_N$	<b>9 Nm</b>
$M_A$	<b>36 Nm</b>
$i$	<b>63 : 1</b>
Rot.	<b>R</b>
S	<b>S1</b>
IP	<b>IP 44</b>
kg	<b>1,100 kg</b>

Figura 14 – Parâmetros dos motores.

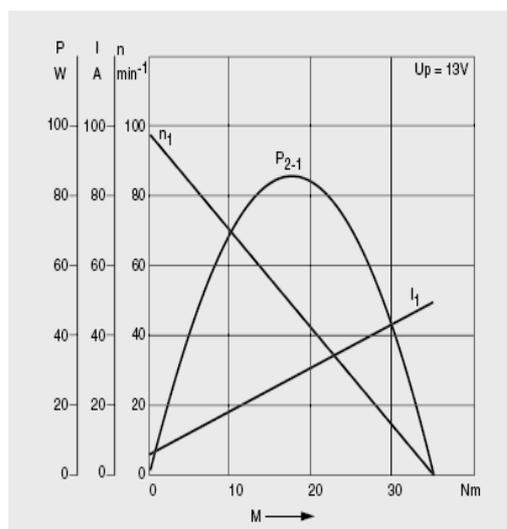


Figura 15 – Curva de desempenho dos motores.

Com o objetivo de se conseguir um maior toque, foram utilizados dois motores em paralelo em um sistema de redução.

Tendo em vista que para aumentar o torque é necessário reduzir-se a velocidade, definiu-se a velocidade mais baixa possível a qual, não compromettesse a resposta do sistema. A velocidade mínima idealizada foi de aproximadamente 30 rpm na saída de cada conjunto.

O sistema de redução utilizado para conseguir a velocidade projetada foi composto por uma engrenagem de 44 dentes e dois pinhões de 18 dentes (Figura 16), calculados através da equação de relação (Eq.4) entre o número de dentes e a velocidade (rpm) dos motores.



Figura 16 – Engrenagem e pinhão utilizados no sistema de redução.

$$\frac{n_a}{n_b} = \frac{z_b}{z_a} \quad \text{Eq.4}$$

Onde  $z_a$  e  $z_b$  são os número de dentes e  $n_a$  e  $n_b$  são os números de rotações por minutos das engrenagens.

A transmissão do movimento dos atuadores para a plataforma do sistema é feita através de um braço e um conjunto barra ponteira, utilizado como haste (figura 17).



Figura 17 – Sistema de movimentação.

#### 4.5. Junta Universal, Guia linear e Mola.

A junta universal foi utilizada para permitir os movimentos rotacionais nos eixos X e Y do sistema, a guia linear é um dispositivo que permite a movimentação translacional no eixo Z e a mola tem como objetivo sustentar o peso de toda a plataforma do sistema mais o peso de

um usuário. Este conjunto, representado pela figura 18, foi projetado para atingir um curso máximo de 150mm.



Figura – 18 – Conjunto guia linear-mola.

Como a mola foi adquirida em um ferro-velho, não tínhamos suas especificações. Portanto, o cálculo da constante de rigidez foi feito experimentalmente, obtendo-se o seguinte gráfico:

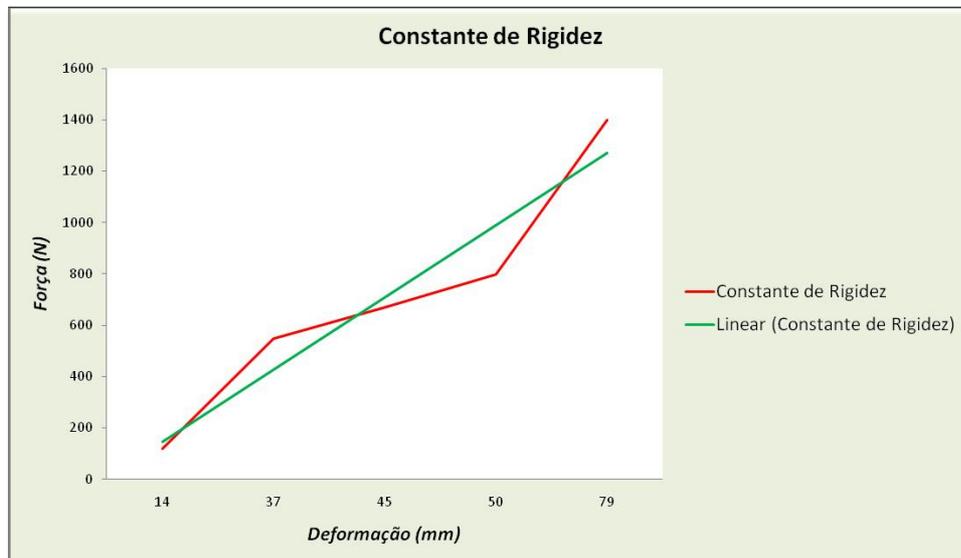


Figura 19 – Gráfico da constante de rigidez da mola.

Com esses dados concluiu-se que a constante de rigidez da mola foi de  $k= 14,4\text{N/mm}$ .

#### 4.6. Estrutura de PVC

A estrutura do *cockpit* foi feita toda em PVC devido à baixa densidade, boa resistência e facilidade de trabalhar com o material. Para unir um cano em outro foram utilizadas as próprias conexões de fábrica, porém quando o ângulo foi diferente de 90 e 45 graus, pegou-se a conexão de valor mais próximo e com a ajuda de um fogareiro moldou-se os mesmo até atingir a inclinação necessária.

Em algumas situações não foi possível utilizar conexões fazendo necessário o corte do PVC em formato específico e através de rebites e cola epóxi fixá-lo no lugar. As estruturas construídas em PVC podem ser vistas nas figuras 20 e 21.



Figura 20 – Estrutura anterior.



Figura 21 – Estrutura posterior.

#### 2.1. Monitores

Foram utilizados três monitores de 20 polegadas *widescreen*, modelo W2053TQ da marca LG. Cada monitor foi desmontado a fim de separar apenas o LCD mostrado na figura 22.



Figura 22 – Monitor utilizado

Os LCDs foram fixados em uma estrutura construída em madeira, de forma a preencher todo o campo visual do usuário (figuras 23 e 24).



Figura 23 – Monitores fixados no suporte



Figura 24 – Montagem final dos monitores

Para dividir a imagem do jogo nos três monitores foi utilizado o *software SoftTH* distribuído gratuitamente na Internet, ele é compatível com diversos jogos incluindo *rFactor*.

#### 4.7. Painel

O painel do simulador foi construído em madeira balsa, banhado em resina epóxi e revestido com adesivo de fibra de carbono. Ele possui quatro áreas na parte da esquerda, sendo elas: Ajudas, Controle geral, Câmeras e Áudio. Em “Ajudas” é possível fazer ajustes no carro como, por exemplo, controle de tração, câmbio automático entre outros. Todos os controles relacionados aos mecanismos de movimentação do simulador estão dispostos em “Controle geral”. Os ajustes de som podem ser feitos na área “Áudio” e em “Câmeras” pode ser ajustada a posição e seleção da câmera no jogo.

A figura 25 mostra a disposição destas áreas no painel.



Figura 25 – Disposição dos comandos na esquerda.

O painel ainda está em desenvolvimento, quando estiver totalmente concluído irá possuir também indicadores de velocidade, combustível, temperatura e conta giro.

#### 4.8. Controle do jogo

Foi utilizado sistema G25 da *Logitech*, o qual é composto por um volante, três pedais, e uma caixa de câmbio. Foram feitas algumas adaptações para o projeto, detalhados nos itens 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3.

##### 4.8.1. Volante

O volante utilizado possui *force feedback*, imprescindível para dar um maior realismo na simulação, e 900° graus de rotação. O cubo do volante foi alongado em 20 mm utilizando uma peça usinada em *Nylon*.

A figura 26 mostra o volante com o adaptador instalado.



Figura 26 – Detalhe do adaptador no cubo.

#### 4.8.2. Pedais

Os pedais do G25 representam com uma boa fidelidade os pedais de um carro de passeio por meio de molas com diferentes coeficientes de rigidez em cada pedal. O conjunto original foi desmontado e remontado de forma invertida (figura 27), em uma estrutura construída em alumínio.

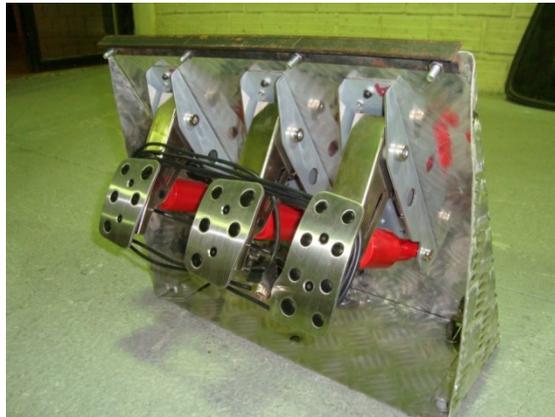


Figura 27 – Adaptação dos pedais.

#### 4.8.3. Caixa de câmbio e freio de mão

A caixa de câmbio original do G25 foi desmontada e remontada, com algumas alterações, em um console construído de alumínio. Como o conjunto da *Logitech* não possui freio de mão, o mesmo foi comprado em um ferro-velho e adaptado para o sistema. A figura 28 mostra o console central montado.

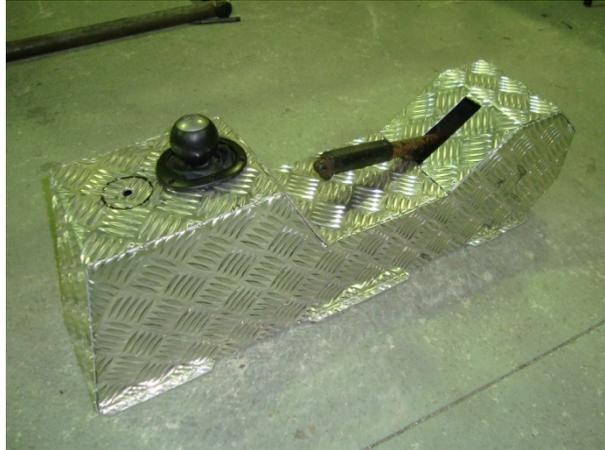


Figura 28 – Console central.

#### 4.9. Jogo

O jogo utilizado no simulador foi o *rFactor*, desenvolvido pela *Image Space Incorporated*, devido à grande quantidade de “MODs” disponíveis. Os MODs são pacotes de opcionais que podem ser baixados diretamente da internet como, por exemplo, temporada de fórmula 1, fórmula *truck* entre outros. O *Software* possui uma plataforma bastante aberta, sendo possível desenvolver *plug-ins* para fazer a interface com um *hardware* específico.

#### 4.10. Software de controle

Foi utilizado o pacote de aplicativos X-Sim, o qual permite fazer a interface entre o jogo e o simulador. Este pacote permite ter acesso a diversas variáveis do jogo, entre elas as forças em que o veículo está sujeito. Esses dados são transmitidos para o microcontrolador que faz a interface com os motores. Uma das telas do *software* está mostrada na figura 29.



Figura 29 – Tela do programa Force profiler.

#### 4.11. Microcontrolador

Neste projeto foi utilizada a placa de desenvolvimento de laboratório de processadores de 2008/1 (figura 30), o qual tem como microcontrolador o LPC2378 de 32 bits. Esta placa é utilizada principalmente para enviar o sinal para os controladores dos motores e ler os valores dos potenciômetros, além de controlar as lógicas de acionamento do sistema ele também faz a interface de todas as entradas e saídas do sistema com o computador.

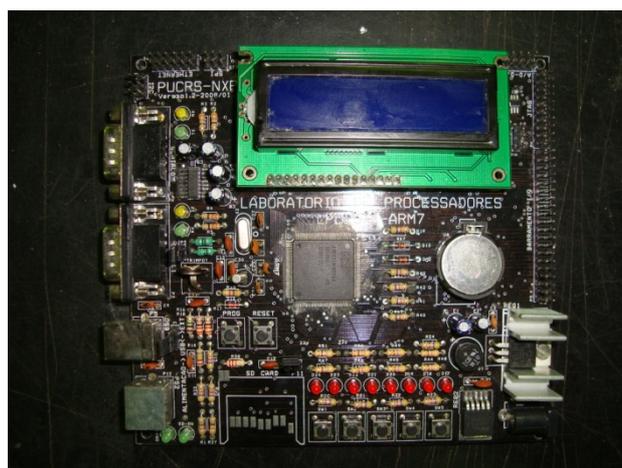


Figura 30 – Placa de desenvolvimento.

Os três potenciômetros utilizados são de 10KΩ, cada um possui 10 voltas de curso e são acoplados nos atuadores, para mensurar a posição dos mesmos.

#### 4.12. Controladores

Foram utilizados três controladores, modelo HB 25 da *Parallax* (figura 31). Este dispositivo permite controlar motores DC de até 0,5 HP de potência. A interface com o microcontrolador é similar à de um servo comum de aeromodelismo, são enviados pulsos de largura variando entre 1ms e 2ms, correspondendo à velocidade máxima para um lado e máxima para o outro lado no motor, ao entrar com pulsos de 1.5ms o dispositivo irá deixar o motor parado.



Figura 31 – Controlador HB 25

O projeto concluído está mostrado na figura 32.



Figura 32 – Visão geral do simulador.

## 5. CONCLUSÃO

Testes iniciais demonstraram que o sistema projetado apresentou bons resultados, mostrando que a escolha dos atuadores e seus sistemas de redução puderam ser utilizados a fim de realizar movimentos fidedignos. A utilização do sistema guia linear-mola provou-se eficiente quando submetido ao peso da plataforma mais do usuário. A mola teve seu comportamento esperado, suportando o peso de todo o conjunto, porém a guia linear precisou ser reforçada por um estabilizador de rotação para não deixar a plataforma rotacionar no eixo z. Percebeu-se a necessidade de reforços estruturais nos atuadores, pois os mesmos deformaram consideravelmente devido ao grande esforço. Também se viu a necessidade da instalação de dissipadores de calor nos motores, devido ao grande aquecimento.

A sensação de imersão foi bastante intensa com a utilização de três monitores, não sendo necessário o fechamento completo do *cockpit*, apesar dessa modificação aumentar ainda mais o realismo.

O sistema apresentou um excelente desempenho se comparado ao seu baixo custo. O projeto ainda está em desenvolvimento, faltando concluir principalmente a interface do painel com o *software* de simulação.

Demais testes devem ser realizados a fim de validar o simulador de direção.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Norton, Robert L.. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 2. ed. Porto Alegre : Bookman, 2004. 931 p. : il.
2. Valentine, Richard. Motor control electronics handbook. New York, NY. 704 p.
3. Nise, Norman S.. Engenharia de sistemas de controle. 3. ed. Rio de Janeiro : LTC, c2002. 695 p.
4. Widmaier, Eric. Fisiologia Humana: os mecanismos das funções corporais. 9. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 2006. 795 p.
5. Kolb, Bryan. Neurociência do comportamento. Barueri: Manoele, 2002. 601 p.
6. Revista Mecatrônica Fácil, Ano 2 – Nº 11 – 2003 – ed. Saber LTDA.
7. Halliday, David. Fundamentos de física. 7. ed. Rio de Janeiro : LTC, 2006-2007. 4 v. : il.
8. Valentine, Richard. Motor control electronics handbook. New York, NY. 704 p.
9. Shigley, Joseph Edward. Projeto de engenharia mecânica. 7. ed. Porto Alegre : Bookman, 2005. 960 p.