

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – IFSC**

GUSTAVO RACHID DUTRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL
PARA JOGOS DE CORRIDA**

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2018.

GUSTAVO RACHID DUTRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL PARA
JOGOS DE CORRIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina – IFSC, como parte
dos requisitos de obtenção do título de
Bacharel em Engenharia
Mecatrônica.

Profº. Maurício Edgar Stivanello, Dr.

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Dutra, Gustavo

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL
PARA JOGOS DE CORRIDA / Gustavo Dutra ; orientação de Maurício
Stivanello. - Florianópolis, SC, 2018.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Microcontrolador. 2. Robótica. 3. Simulador.
I. Stivanello, Maurício. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III.
Título.

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL PARA JOGOS DE CORRIDA

GUSTAVO RACHID DUTRA

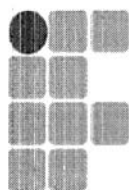
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Florianópolis, 04 de julho de 2018.

Prof. Orientador Mauricio Edgar Stivanello, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Cynthia Beatriz Scheffer Dutra, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Adriano Regis, Me.
Instituto Federal de Santa Catarina



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

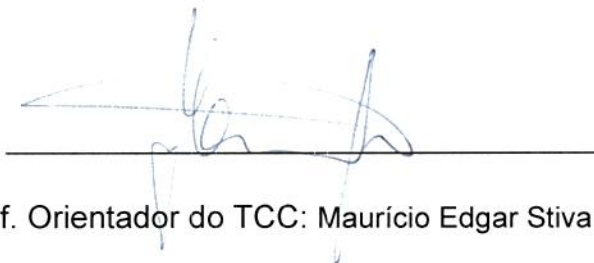
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **GUSTAVO RACHID DUTRA**, matrícula nº **132004526-0**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL PARA JOGOS DE CORRIDA**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 04 de julh de 2018.



Prof. Orientador do TCC: Maurício Edgar Stivanello

Dedico este trabalho a minha avó Edith Pinto Mery Rachid, ao meu avô Salomão Rachid (*in memoriam*), que em vida me deu todo seu amor e carinho. Aos meus pais Lourival e Mara, que me educaram. A minha tia, Marilea, que me acompanhou e me deu forças para seguir durante esta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Lourival Dutra e Mara Izilda Rachid, e a minha tia, Marilea Pinto Mery Rachid, que me educaram, me cuidaram e passaram seus ensinamentos ao longo de minha vida. Possuo imensa admiração e gratidão por tudo que eles fizeram e fazem por mim.

Aos meus avós, Edith e Salomão (*in memorian*), que assim como meus pais, me educaram e me deram todo seu amor, parte do que sou hoje devo a eles.

Aos meus amigos Antônio Abreu, Mariano Simi, Pablo Rodrigo Simi, Pedro Paulo Braga, Carlos Eduardo Pessi, Victor Loch, que me acompanham desde a infância até os dias de hoje, sempre me aconselhando e partilhando comigo todos os momentos de suas vidas, eles fazem parte da minha história.

A minha namorada Julia Maciel Silva, a qual me deu grande apoio durante todo o curso, sempre me incentivando e me dando suporte durante toda a graduação.

Aos meus colegas de curso pelos momentos felizes e de alegrias que vivenciamos durante a trajetória.

Aos técnicos do MOP, principalmente ao Charles Nuernberg, Carlos Rafael Garcia, Fagney Cunha e Fábio Leon pelas dicas e ajudas prestadas no desenvolvimento dos trabalhos.

Aos professores e funcionários do curso, pela dedicação e esforço, pela contribuição significativa para minha formação acadêmica, principalmente o professor Mauricio Stivanello, meu orientador, que me deu suporte e apoio na elaboração deste trabalho.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho: meu cordial agradecimento.

“Eu escuto, eu esqueço.
Eu vejo, eu lembro.
Eu interajo, eu entendo.”
(Provérbio Chinês)

RESUMO

No presente trabalho é descrito o desenvolvimento de um simulador de movimento para jogos de corrida, com baixo custo e de projeto simples, para que, juntamente com os gráficos de última geração já existentes hoje, torne a experiência de jogar ainda mais realista. Os desdobramentos deste trabalho serão feitos através da concentração de todas as áreas da mecatrônica, de modo que todo conhecimento adquirido durante a graduação seja colocado em prática. Foi projetado o protótipo mecânico, eletrônico e de software necessários para controle do mesmo, os quais resultaram na montagem de um protótipo funcional.

Palavras-chave: jogos, microcontrolador; robótica; simulador.

ABSTRACT

The present document describes the development of a low cost and simple design racing simulator for games in order to improve the immersion capabilities of the latest games generation, so people can have an even more realistic gaming experience. The project covers all areas of mechatronics, so that all the knowledge acquired during the graduation is put into practice. The mechanic and electronic project along with the software has been developed in order to build a functional prototype.

Keywords: games, microcontroller; robotics; motion simulator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sensorama	18
Figura 2 - Super Cockpit	19
Figura 3 - Eixos translacionais e rotacionais	20
Figura 4 - Forças e orientações utilizadas em jogos	21
Figura 5 – Simulador 2 DOF com atuadores lineares.....	22
Figura 6 - Simulador 2 DOF de baixo custo	22
Figura 7 - Simulador 2 DOF + Traction Loss	23
Figura 8 - Simulador 4 DOF	24
Figura 9 - Simulador 6 DOF	24
Figura 10 - Kit G27	25
Figura 11 - Manche	26
Figura 12 - Oculus Rift	26
Figura 13 - Aceleração e desaceleração	28
Figura 14 - 2 DOF	30
Figura 15 - 6 DOF	31
Figura 16 - Projeto CAD	33
Figura 17 - Trigonometria utilizada nas equações de distância	34
Figura 18 - Forças presentes na estrutura	36
Figura 19 - Ângulos e forças para os cálculos do motor	38
Figura 20 - Homocinética	39
Figura 21 - Terminal rotular	40
Figura 22 - Diagrama elétrico.....	42
Figura 23 - Fluxograma do código.....	43
Figura 24 - Materiais comprados.....	45
Figura 25 - Montagem da estrutura	46
Figura 26 - Solda da homocinética.....	46
Figura 27 - Montagem mecânica final	47
Figura 28 - Montagem final	48
Figura 29 – Ângulo ao redor de X (graus) x Tempo (milissegundos)	50
Figura 30 - Ângulo ao redor de Y (graus) x Tempo (milissegundos)	51
Figura 31 - Testes do Simulador.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros relevantes para escolha do número de graus de liberdade..	31
Tabela 2 – Parâmetros relacionados aos materiais utilizáveis na estrutura	38
Tabela 3 – Parâmetros utilizados na escolha dos motores	40
Tabela 4 – Parâmetros utilizados na escolha do controlador	41
Tabela 5 - Convenções para o software	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DOF – Graus de liberdade (Degrees of Freedom)

RV – Realidade virtual

CAD – Desenho assistido por computador (Computer Aided Design)

PID – Proporcional, integrativo, derivativo

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

MOP – Laboratório de Máquinas Operatrizes

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo geral	15
1.1.2 Objetivo específico	15
1.2 Justificativa e Relevância	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Realidade Virtual	17
2.2 Simuladores	17
2.3 Simuladores de Movimento e Graus de Liberdade	20
2.3.1 Simulador com 2 Graus de Liberdade	21
2.2.2 Simulador com 2 Graus de Liberdade com Traction Loss	23
2.3.3 Simulador com 4 Graus de Liberdade	23
2.3.4 Simulador com 6 Graus de Liberdade	24
2.3.5 Outros Dispositivos Empregados em Simuladores	25
2.4 Simulação das Principais Forças em Jogos de Corrida	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Requisitos	29
3.2 Projeto Mecânico	29
3.2.1 Escolha dos Graus de Liberdade	29
3.2.2 Desenvolvimento do Projeto Mecânico	32
3.2.3 Cálculos da Estrutura	33
3.2.4 Estrutura Mecânica	38
3.2.5 Apoio central	39
3.2.6 Juntas Secundarias	39
3.3 Projeto Eletrônico	40
3.3.1 Motores e drivers	40
3.3.2 Controladores	41
3.3.3 Fonte	41
3.3.4 Interconexão dos componentes	42
3.4 Projeto de Software	42
3.5 Montagens	44
3.5.1 Montagem Mecânica	45

3.5.2 Montagem Eletrônica	47
3.5.3 Programação	48
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	50
5 CONCLUSÃO	53
6 REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O setor de desenvolvimento de jogos digitais vem crescendo cada vez mais no Brasil e no mundo, e, conseqüentemente estão surgindo diversas novas tecnologias para os jogos, como por exemplo, o advento da realidade virtual. Assim nasceu um mercado pouco explorado pelas empresas brasileiras, os simuladores voltados para o entretenimento.

Atualmente no Brasil os simuladores são utilizados principalmente para treinamentos nas áreas automotivas e aeronáuticas, em razão do alto custo do equipamento e pela falta de empresas para fabricar esse tipo de produto. Por este motivo, este tipo de equipamento é pouco explorado para o lazer.

O presente projeto tem como finalidade criar um protótipo de simulador voltado principalmente para o lazer, unindo plataformas de realidade virtual (*Oculus Rift*), volantes com *force feedback* (G27) e microcontroladores de baixo custo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho foi desenvolver um protótipo de simulador de corrida para jogos com baixo custo, para possibilitar a integração com equipamentos de realidade virtual e volantes com *force feedback*. Com isso é possível alcançar uma experiência mais completa em diversos jogos.

1.1.2 Objetivo específico

Para atender ao objetivo geral deste trabalho foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar estudo teórico e busca por projetos correlatos;
- Projetar a parte mecânica do simulador;
- Projetar e implementar o sistema eletrônico para controle do movimento;
- Desenvolver o módulo de *software* responsável pela leitura de dados e controle de atuadores;
- Validar o protótipo desenvolvido.

1.2 Justificativa e Relevância

A capacidade de imersão de um jogo depende de muitos fatores, como gráficos, som, animações, jogabilidade¹, entre outros. Devido as novas *Engines* utilizadas para a programação dos jogos, atualmente eles estão muito próximos de atingir o nível máximo de imersão possível em um jogo reproduzido por um monitor com imagens em apenas duas dimensões, o que leva ao desenvolvimento de novas tecnologias para aumentar a imersão de tais aplicativos e jogos.

Atualmente, vivemos no momento de desenvolvimento de novas tecnologias voltadas as mídias digitais. Em 2017 foi iniciada a venda do primeiro óculos de realidade virtual voltado para uso doméstico a um preço acessível. Com isso criou-se um mercado de jogos voltados para realidade virtual que só tende a crescer, e junto com ele estão sendo desenvolvidas outras tecnologias, como por exemplo os simuladores de movimento, luvas para realidade virtual com *Force Feedback*, entre outros.

Deste modo, acredita-se que seja um ótimo momento para desenvolvimento de tais inovações. Em diversos lugares no mundo há várias empresas já comercializando esses produtos, todavia no Brasil é extremamente difícil encontrar fornecedores de tais produtos, ou até mesmo de componentes para construí-los, o que nos deixa atrasados em relação ao resto do mundo. Com a construção deste simulador pretende-se contribuir para a popularização deste tipo de tecnologia no Brasil.

¹ Expressão utilizada na indústria de jogos eletrônicos que engloba todas as experiências do jogador durante a sua interação com o jogo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo serão apresentados aspectos relevantes e utilizados na descrição do trabalho desenvolvido. Inicialmente será discorrido um breve histórico acerca da realidade virtual, e em seguida, sobre os simuladores. Após, será relatado sobre os graus de liberdade e simulação de forças.

2.1 Realidade Virtual

A expressão “realidade virtual” foi empregada pela primeira vez no livro *Le Théâtre et son double*, do autor francês, Antonin Artaud, em 1938. Ele, de certa forma, criou o termo ao propor um teatro onde a ilusão natural de personagens e objetos criavam uma realidade virtual. Porém, antes mesmo desse termo subsistir, já existiam algumas experiências que possibilitavam transportar as pessoas para outros lugares. Os óculos estereoscópicos, por exemplo, já existiam desde os anos 1920. Eles possuíam cartões em 3D de pontos turísticos e antecederam os óculos de realidade virtual que conhecemos hoje. Em seguida, em 1939, foi apresentado na feira internacional de ciências em Nova York o “*View-Master*”, tratava-se de um óculos estereoscópico que servia para ver *slides* em um disco dentado, ele virou um brinquedo muito popular. (MACHADO; NETTO; OLIVEIRA, 2002).

Atualmente, a maioria das pessoas que já ouviram o termo “realidade virtual” foi certamente por causa de algum produto da área de entretenimento, seja na área de filmes, seja na área dos jogos. Na esfera dos jogos, já há interfaces que proporcionam ao *gamer* adentrar completamente em um jogo, tornando a experiência de jogar cada vez mais verdadeira.

2.2 Simuladores

Pode-se dizer que a simulação por intermédio de computadores teve grande impulsionamento na Segunda Guerra Mundial, ocasião em que foram utilizados para realizar os cálculos balísticos desse período. Sua finalidade era simular o lançamento de mísseis. Até o fim da década de 50, o desenvolvimento dos simuladores era voltado extremamente para fins militares, eram feitos com enormes computadores programados em linguagem Fortran IV, rodando *softwares* meramente textuais.

A indústria do entretenimento também teve um papel indispensável ao construir um simulador chamado Sensorama, apresentado na Figura 1. Este simulador era uma espécie de cabine que combinava filmes 3D, som estéreo, vibrações mecânicas, aromas e ar movimentado por ventiladores, sendo patenteado em 1962 por Morton Heilig.

Figura 1 - Sensorama



Fonte - Adaptado de MACHADO; NETTO; OLIVEIRA

Em torno de 1965, Ivan Sutherland marcou o início da computação gráfica, quando apresentou para a comunidade científica a ideia de desenhar objetos de modo direto na tela do computador através de uma caneta ótica. Sutherland desenvolveu o primeiro vídeo-capacete inteiramente funcional para gráficos de computador, ele possibilitava ao usuário observar, movimentando a cabeça, os diferentes lados de um cubo representado por um modelo fio-de-arama flutuando no espaço. (MACHADO; NETTO; OLIVEIRA, 2002).

Em 1975, Myron Kruger criou o *videoplace*, no qual uma câmera de vídeo capturava a imagem dos participantes e projetava em uma grande tela, os participantes podiam interagir uns com os outros e com os objetos projetados nessa tela, sendo que seus movimentos eram constantemente capturados e processados, essa técnica ficou conhecida como RV de Projeção. No final da década de 70, linhas de montagem de automóveis já empregavam a simulação para solucionar problemas

de segurança e aperfeiçoar a produção. Também nesta década aconteceu a introdução da simulação nos negócios. (MACHADO; NETTO; OLIVEIRA, 2002).

Em seguida, em 1982, Thomas Furness apresentou para a Força Aérea Americana um simulador que usava computadores e vídeo capacetes interligados para apresentar o espaço 3D da cabine de um avião. Os vídeo-capacetes integravam os componentes de áudio e vídeo, possibilitando aos pilotos aprender a voar e lutar sem decolar verdadeiramente, este era o chamado “*Super Cockpit*” demonstrado na Figura 2. (MACHADO; NETTO; OLIVEIRA, 2002).

Figura 2 - Super Cockpit



Fonte – Adaptado de MACHADO; NETTO; OLIVEIRA

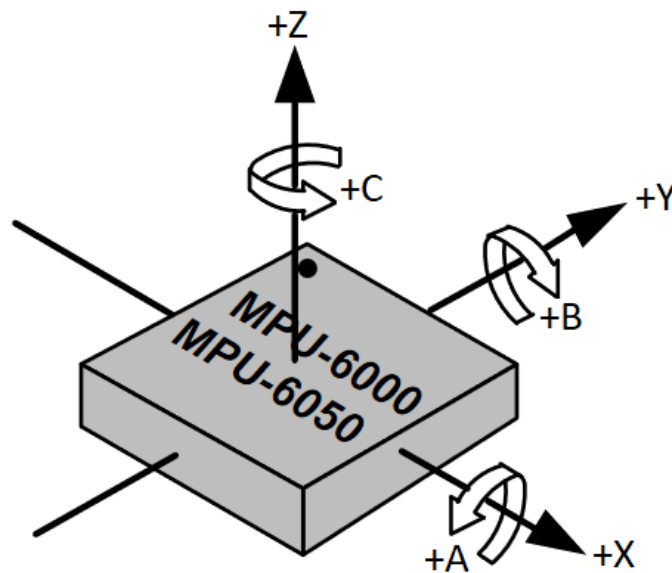
Nos anos 90, o uso de simuladores se tornou maior devido a redução dos custos com equipamentos, do aumento da velocidade de processamento e pela simplificação das ferramentas de desenvolvimento. A partir de então, simulação passou a expandir como um meio eficiente para a elaboração de projetos, animações, pesquisas, e com muitas outras aplicações utilizadas nos dias atuais.

2.3 Simuladores de Movimento e Graus de Liberdade

Os diversos tipos de simuladores existentes podem ser divididos em categorias de acordo com a quantidade de graus de liberdade que possuem. Os graus de liberdade são “direções independentes nas quais se pode deslocar um objeto sólido” (CADOZ, 1996, p.129). Eles são classificados de acordo com o número de eixos que a estrutura pode se movimentar, tratando-se de três translacionais e três rotacionais, representados na Figura 3. Sendo os translacionais:

- X
- Y
- Z

Figura 3 - Eixos translacionais e rotacionais



Fonte: Adaptado de MPU6050 Datasheet

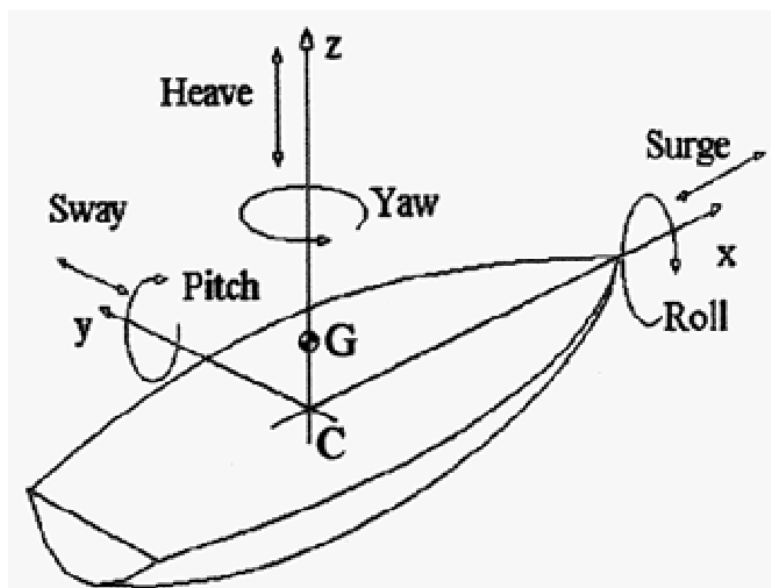
Na Figura 3, “A”, “B” e “C” representam:

- A: Rotação em torno do eixo X, no ramo aeronáutico também pode ser chamado de eixo de rolagem (*Roll*);
- B: Rotação em torno do eixo Y, arfagem (*Pitch*);
- C: Rotação em torno do eixo Z, guinada (*Yaw*);

As forças longitudinais ao longo dos eixos translacionais também são

chamadas de *Surge*, *Sway* e *Heave* respectivamente, conforme exibido na Figura 4. Todos os *softwares* utilizados para retirar dados dos jogos utilizam esse tipo de denominação para as forças aplicadas sobre os veículos ou aeronaves.

Figura 4 - Forças e orientações utilizadas em jogos



Fonte: Adaptado de GUERRA

Os simuladores de baixo custo normalmente possuem apenas os movimentos de *Roll* e *Pitch*, pois são mais simples do ponto de vista mecânico e da cadeia cinemática quando comparados com os outros tipos de simuladores. Porém, podem ser encontrados simuladores de até seis graus de liberdade no mercado. Além de ser possível dividir os simuladores pelo número de graus de liberdade, também é possível dividi-los de acordo com seu tipo de atuador, onde os principais são os atuadores lineares e motores elétricos com braço de alavanca. Os atuadores lineares são menos utilizados, visto que são de maior complexidade mecânica e de maior valor. Na sequência são apresentados exemplos de simuladores empregando diferentes graus de liberdade.

2.3.1 Simulador com 2 Graus de Liberdade

É o mais básico dos simuladores, conforme pode ser observado nas Figura 5 e Figura 6. Com esse tipo de simulador é possível somente simular o *Roll* e *Pitch*, porém por mais simples que seja, possui a capacidade de aumentar incrivelmente a imersão

com nos jogos. Os simuladores com dois graus de liberdade estão na faixa de \$1500 dólares.

Figura 5 – Simulador 2 DOF com atuadores lineares



Fonte: Adaptado de SimXperience

O simulador apresentado na Figura 5 é vendido comercialmente. Este modelo é diferente da grande maioria dos simuladores de dois graus de liberdade encontrados no mercado pois ele utiliza dois atuadores lineares, enquanto o mais comum é utilizar motores rotativos com um braço de alavanca para movimentar a estrutura.

Figura 6 - Simulador 2 DOF de baixo custo



Fonte: Adaptado de DOF Reality

A Figura 6 representa um simulador encontrado a preços mais baixos em comparação aos produtos que utilizam atuadores lineares, tendo em vista que os atuadores lineares necessitam ter alta velocidade para essa aplicação, o que os deixa bem mais caros em relação ao sistema de braço de alavanca utilizado na Figura 5.

2.2.2 Simulador com 2 Graus de Liberdade com Traction Loss

Com esse simulador é possível ter o movimento do *Roll*, *Pitch* e *Traction Loss*, que é a simulação do movimento de derrapagem traseira. Estes modelos estão na faixa de \$5200 dólares, pois há mais um atuador traseiro, o qual movimenta toda a estrutura ao redor de um pivô que nem sempre está situado no mesmo ponto de origem dos eixos X e Y. Sua estrutura pode ser observada na Figura 7.

Figura 7 - Simulador 2 DOF + Traction Loss



Fonte: Adaptado de SimXperience

2.3.3 Simulador com 4 Graus de Liberdade

Esse simulador, conforme apresentado na Figura 8, possui movimento de *Roll*, *Pitch*, *Yall* e *Heave*, que é a força ao longo do eixo Z.

Figura 8 - Simulador 4 DOF



Fonte: Adaptado de Motion-Sim

2.3.4 Simulador com 6 Graus de Liberdade

Possui movimentos em todos os seis eixos, é o mais completo simulador em termos de graus de liberdade e custa em torno de EU 8000 euros.

Figura 9 - Simulador 6 DOF



Fonte: Adaptado de G Force Factory

2.3.5 Outros Dispositivos Empregados em Simuladores

Além dos simuladores de movimentação apresentados na seção anterior, outros dispositivos são utilizados, como por exemplo o volante, pedais e marcha. Caso seja um jogo de aeronave, é necessário o equipamento para tal, como *joysticks* especiais. No mercado encontra-se todos esses equipamentos a disposição, visto ser uma tecnologia antiga, e que se encontra disponível a um preço razoável. No Brasil é possível encontrar *kits* para jogos de corrida por aproximadamente R\$ 1200,00 reais, e kits para jogos de aeronave por aproximadamente R\$ 600,00 reais. Esses equipamentos podem ser observados na Figura 10 e Figura 11.

Figura 10 - Kit G27



Fonte: Adaptado de Logitech

O sistema demonstrado na Figura 10 possui volante com *force feedback*, pedais e câmbio com conexão direta com a maioria dos jogos disponíveis no mercado, isso faz com que ele seja um dos mais populares atualmente.

Figura 11 - Manche



Fonte: Adaptado de Saitek

O manche, demonstrado na Figura 11, facilita quando se trata de jogos que possuem aeronaves, tendo em vista que possui diversos botões e analógicos dedicados para o controle das aeronaves.

Nos dias atuais, a chegada dos óculos de realidade virtual tornou possível aumentar ainda mais a imersão que os jogos proporcionam, através dos óculos de realidade virtual, como é o caso do *Oculus Rift*, que está disponível por cerca de \$600 dólares.

Figura 12 - Oculus Rift



Fonte: Adaptado de Oculus

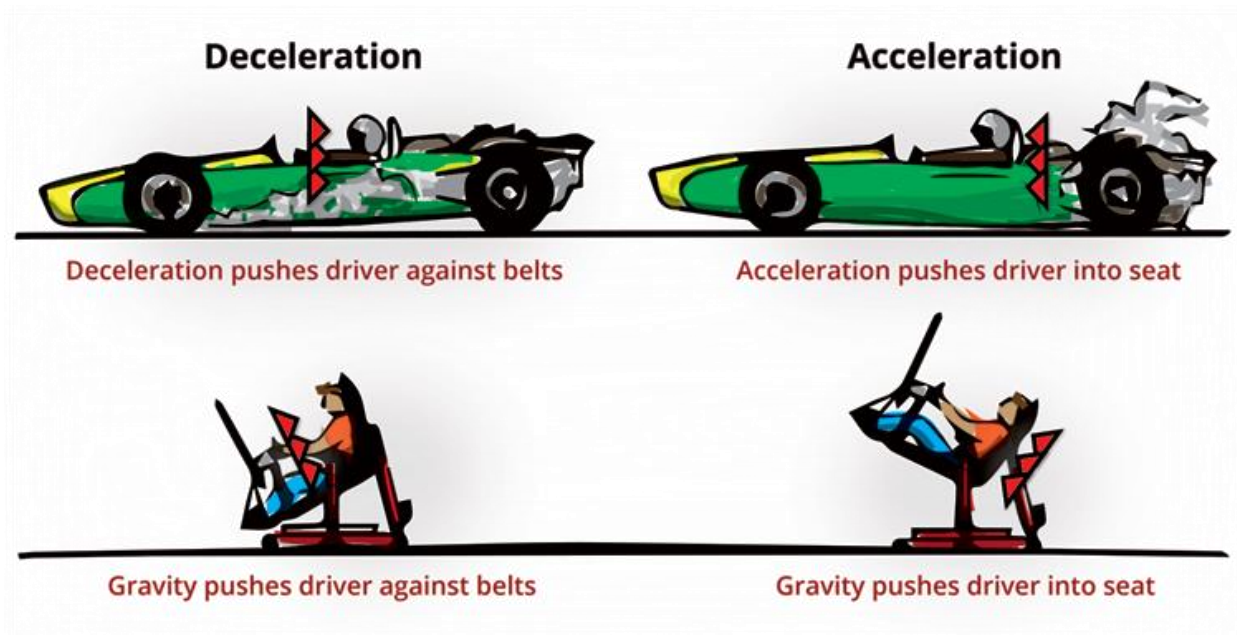
O óculos *Rift*, representado na *Figura 12*, juntamente com o *HTC Vive*, outro modelo de óculos de realidade virtual, foram os primeiros a popularizar os óculos de realidade virtual para o uso recreativo doméstico. Eles criaram um mercado para jogos de realidade virtual que agora conta com o suporte de diversas empresas especializadas em comércio e desenvolvimento de jogos, como é o caso da *Steam*, que agora possui suporte para realidade virtual diretamente em sua loja.

É importante separar as tecnologias denominadas de realidade virtual, sendo que existem dois tipos principais, a realidade aumentada, que trata de adicionar conteúdo virtual a nossa realidade já existente, e a realidade virtual em si, que é a criação ou emulação de um ambiente totalmente virtual, mesmo que tal ambiente já exista em nossa realidade. Quando todas essas tecnologias se juntam, é possível reproduzir quase todas as sensações de uma corrida real, contudo, hoje em dia poucas pessoas possuem acesso a todas essas tecnologias, o que dificulta o desenvolvimento e a popularização dos simuladores.

2.4 Simulação das Principais Forças em Jogos de Corrida

Para que se possa escolher o número de graus de liberdade, é necessário compreender quais as principais forças que são sentidas enquanto estamos dirigindo um veículo. No momento que aceleramos, o banco faz uma força no motorista no mesmo sentido da aceleração, e devido a inércia do motorista, esse movimento pode ser simulado através de um movimento de *Pitch* para trás, fazendo com que o componente da gravidade, empurrando o usuário para o encosto, simule o movimento de aceleração.

Figura 13 - Aceleração e desaceleração



Fonte: Adaptado de SFFAIR

Já nas curvas, através do atrito dos pneus, tem-se uma força centrípeta, fazendo com que o veículo faça curvas, e consequentemente, devido a inércia do motorista em seguir a trajetória em linha reta, o cinto efetua uma força no motorista, no mesmo sentido da força centrípeta, esta força pode ser simulada com um movimento de *Roll* para o lado oposto ao da curva.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os requisitos do projeto, o projeto mecânico, bem como o modo pelo qual foi feita a escolha dos graus de liberdade, o desenvolvimento do projeto mecânico e os cálculos da estrutura.

3.1 Requisitos

Os requisitos são uma parte importante no projeto, pois é com base neles que são definidos os módulos e a arquitetura geral do sistema, assim como seus componentes. O objetivo principal é desenvolver um simulador de baixo custo. Então os requisitos foram escolhidos de maneira a potencializar a imersão concedida pelo simulador com um baixo custo. Assim, definiu-se requisitos funcionais e não funcionais. Dentre os requisitos funcionais, tem-se:

- Transformar os parâmetros de força e orientação extraídos de jogos comerciais em movimentação condizente com a representação virtual do veículo;
- Simular a orientação dos veículos;
- Simular as forças atuantes nos veículos.

Por sua vez, os requisitos não funcionais são:

- Suportar uma carga máxima de 130 kg (20 kg estrutura + 110 kg usuário);
- Alcançar uma amplitude de movimento de ± 5 graus;
- Empregar o valor máximo de R\$ 1500,00 em materiais.

3.2 Projeto Mecânico

Na presente seção são descritos os aspectos do projeto mecânico, com detalhes sobre a concepção de cada módulo que compõe o sistema, explicando o porquê de tais escolhas, bem como os prós e os contras.

3.2.1 Escolha dos Graus de Liberdade

A escolha do número de graus de liberdade do simulador é um ponto crucial no desenvolvimento do sistema, visto que quanto maior o número de graus de liberdade, maior é a imersão que o usuário consegue presenciar, e maior a complexidade do

projeto. Analisando os simuladores quanto aos números de graus de liberdade, sabe-se que o número de atuadores e componentes de acionamento são proporcionais a essa escolha. Outro fator, é que o número de controladores pode variar dependendo da demanda de processamento. Em um sistema com vários graus de liberdade tem-se um grande número de variáveis e cálculos necessários, o que pode exigir um maior número de controladores para controlar o sistema, impactando no custo final da solução.

Como um dos objetivos do projeto é facilitar o acesso a este tipo de tecnologia para uso doméstico, tem-se como requisito importante o baixo custo. Isso impacta na decisão da escolha do número de graus de liberdade do simulador que será construído, visto que o valor dos componentes aumenta proporcionalmente em relação ao mesmo.

Como pode-se observar na Figura 14 e Figura 15, o tamanho da estrutura como um todo não varia significativamente, entretanto o número de motores, redutores e juntas aumenta de acordo com a adoção de mais graus de liberdade. Essa variável impacta tanto no que se refere à aquisição de peças e componentes como na complexidade e no custo de implementação do sistema.

Figura 14 - 2 DOF



Fonte: Adaptado de Motion for Simulators

Figura 15 - 6 DOF



Fonte: Adaptado de Motion for Simulators

Para dar uma ampla sensação de movimento é necessário no mínimo dois eixos, pois as forças mais perceptíveis são as de aceleração/frenagem e a força centrípeta presente no momento das curvas. Com isso, foi feita uma tabela de comparação para analisar as alternativas e escolher a melhor delas.

Tabela 1 – Parâmetros relevantes para escolha do número de graus de liberdade

Escolha do número de graus de liberdade		
Graus de liberdade	Custo estimado	Dificuldade de construção
1 DOF	x1	Fácil
2 DOF	x1,5	Média
3 DOF	x2	Alta
4 DOF	x2.5	Muito alta
5 DOF	x3	Muito alta
6 DOF	x3.5	Muito alta

Fonte: Elaboração própria

O custo estimado foi feito considerando que o valor de um motor, conjunto com redução e *driver*, é o mesmo valor da estrutura.

O parâmetro mais relevante na escolha foi a dificuldade de construção, visto que simuladores com mais de 3 graus de liberdade tendem a ser mais complexos,

exigindo mais tempo de pesquisa e planejamento, o que levaria a não conclusão do protótipo no tempo estipulado.

Com base nos dados acima expostos, foi escolhido um simulador com apenas dois graus de liberdade com as seguintes amplitudes de movimentação:

- Amplitude de movimentação ao redor do eixo X (*Roll*): ± 5 graus
- Amplitude de movimentação ao redor do eixo Y (*Pitch*): ± 5 graus

3.2.2 Desenvolvimento do Projeto Mecânico

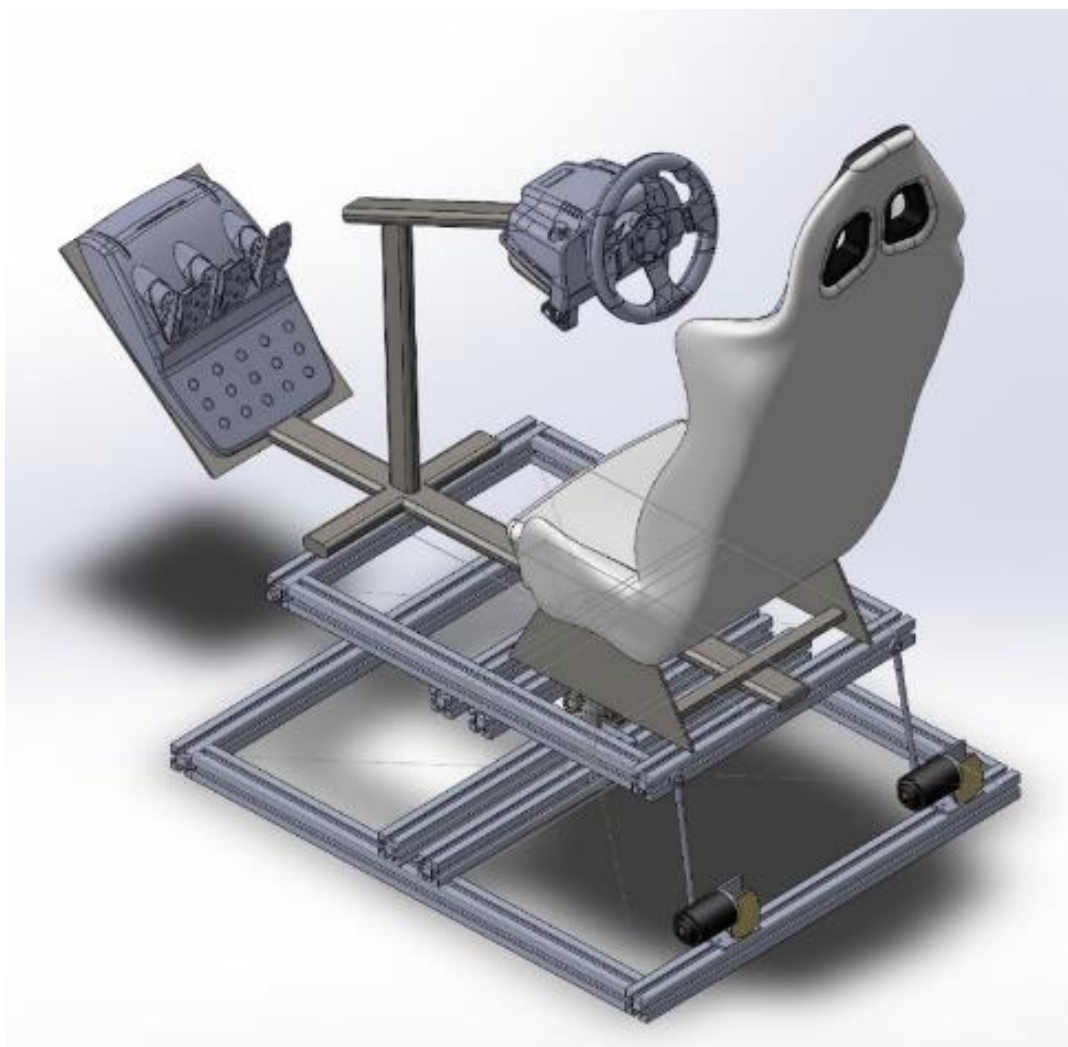
A amplitude de movimentação tem grande impacto no valor final, pois quanto maior a movimentação requerida, mais potente terá que ser o atuador (considerando um atuador linear que tem um *range* de movimento fixo), considerando que ele deverá se aproximar do centro de apoio para aumentar a amplitude de movimento, diminuindo a distância ao ponto de apoio e aumentando a força que o mesmo fará.

As amplitudes de movimento foram determinadas com base no necessário para potencializar a imersão proporcionada pelo simulador, e ao mesmo tempo, não aumentar os custos, portanto só resta determinar o tipo de estrutura mecânica a ser utilizada. Existem dois principais tipos de estruturas para esse *range* de movimentação, uma utilizando atuadores lineares para movimentar diretamente a estrutura principal, como é o caso do exemplo apresentado na Figura 5, e a outra utilizando um braço de alavanca posicionado no eixo do moto como apresentado na Figura 6.

No que se refere a primeira abordagem possível, constatou-se que existem disponíveis atuadores lineares. Porém, os de baixo custo não podem ser utilizados em regime contínuo como o exigido, o que os torna inviáveis para essa aplicação. Por sua vez, a segunda abordagem, relativa a utilização de braço de alavanca no eixo do motor é viável do ponto de vista econômico e funcional.

Considerando essas questões, foi desenvolvido o projeto inicial apresentado na Figura 16, contemplando a estrutura mecânica e atuadores.

Figura 16 - Projeto CAD



Fonte: Elaboração própria

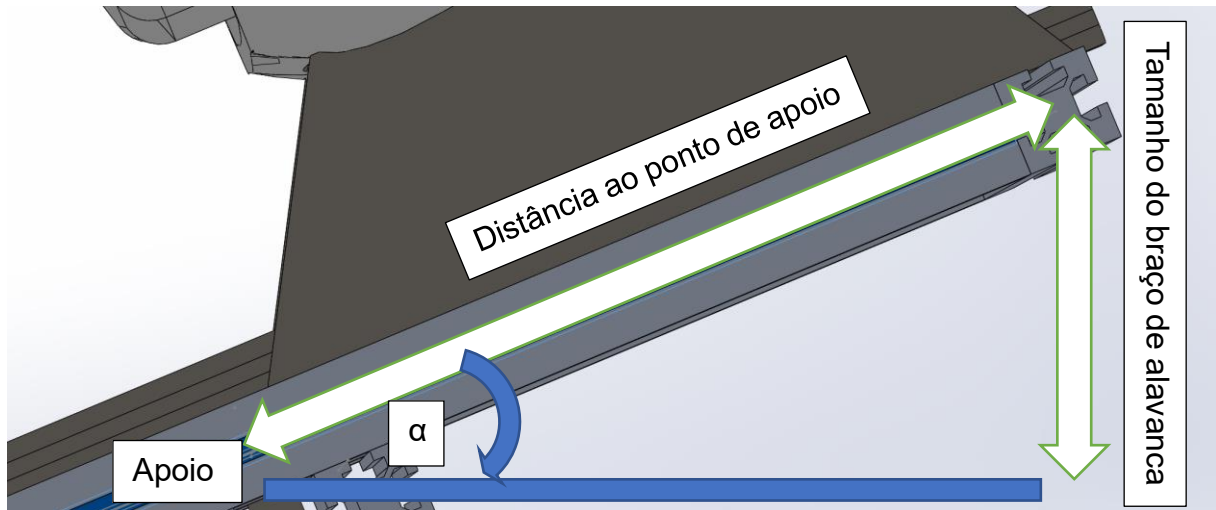
3.2.3 Cálculos da Estrutura

Destarte, com base no desenho preliminar apresentado na Figura 16, foram realizados os cálculos necessários para os ajustes da estrutura e dimensionamento do motor. Como possuía-se o ângulo de *Pitch* e *Roll* que queria-se alcançar, pôde ser calculada a distância dos atuadores em relação ao centro de apoio da cadeira, observado a definição de um valor de comprimento para o braço de alavanca do motor. Foi necessário definir um comprimento para o braço de alavanca, pois caso esta seja uma variável, a equação poderá ter infinitos valores de distância e comprimento que a satisfaçam.

Os cálculos podem ser feitos utilizando trigonometria, como ilustrado na Figura 17, já que a hipotenusa seria a distância até o ponto de apoio, α - o ângulo máximo

de movimentação, e o cateto oposto sendo o tamanho do braço de alavanca, que neste caso funcionará como se fosse metade do curso de um atuador linear.

Figura 17 - Trigonometria utilizada nas equações de distância



Fonte: Elaboração própria

Dessa forma, para calcular a distância entre o atuador e o centro de apoio, podemos utilizar a definição do seno dada por:

$$\sin \beta = \frac{\text{comprimento braço de alavanca}}{\text{distancia ate o centro de apoio}} \quad (1)$$

Então a distância até o centro de apoio pode ser calculada por:

$$\text{distancia ate o centro de apoio} = \frac{\text{comprimento braço de alavanca}}{\sin \beta} \quad (2)$$

$$\text{distancia ate o centro de apoio} = \frac{0,03}{\sin 5} = 0,344 \text{ metros} = 34,4 \text{ centimetros} \quad (3)$$

Posteriormente, foi calculado o torque aproximado atuante nos motores e a carga que o apoio central deveria suportar. Basta fazer a análise lateral, ao longo do

eixo X, na posição crítica, maior carga possível em um dos motores, pois a soma das forças e dos momentos estaticamente é igual a zero. O mesmo acontece ao longo do eixo Y. Utilizou-se a massa distribuída da cadeira e da pessoa como um ponto de força único, localizado no centro de massa do conjunto para o cálculo de força nos motores e eixos.

Primeiramente, com base nas variáveis indicadas na Figura 18, foi definido o somatório das forças como:

$$\sum \text{Forças: } F_{carga} = F_{apoio} + (2 \times F_{haste}) \quad (4)$$

Por sua vez, o somatório dos momentos foi definido como:

$$\sum \text{Momentos: } F_{carga} \times \text{distancia carga} = 2 \times F_{haste} \times \text{distancia haste} \quad (5)$$

Com isso, pode-se isolar a variável F_{haste} da equação do momento para descobrir a força necessária na haste do motor.

$$F_{haste} = F_{carga} \times \frac{\text{distancia carga}}{2 \times \text{distancia haste}} \quad (6)$$

Substituindo os valores temos:

$$F_{haste} = 1300 \times \frac{0,15}{2 \times 0,344} = 283,4 \text{ N} \quad (7)$$

Utilizando a equação do somatório das forças, pode-se descobrir a força F_{apoio} . Porém foi necessário substituir o valor F_{haste} encontrado anteriormente, para que F_{apoio} fique somente em função de F_{carga} , e das distâncias previamente definidas. Este desenvolvimento é dado por:

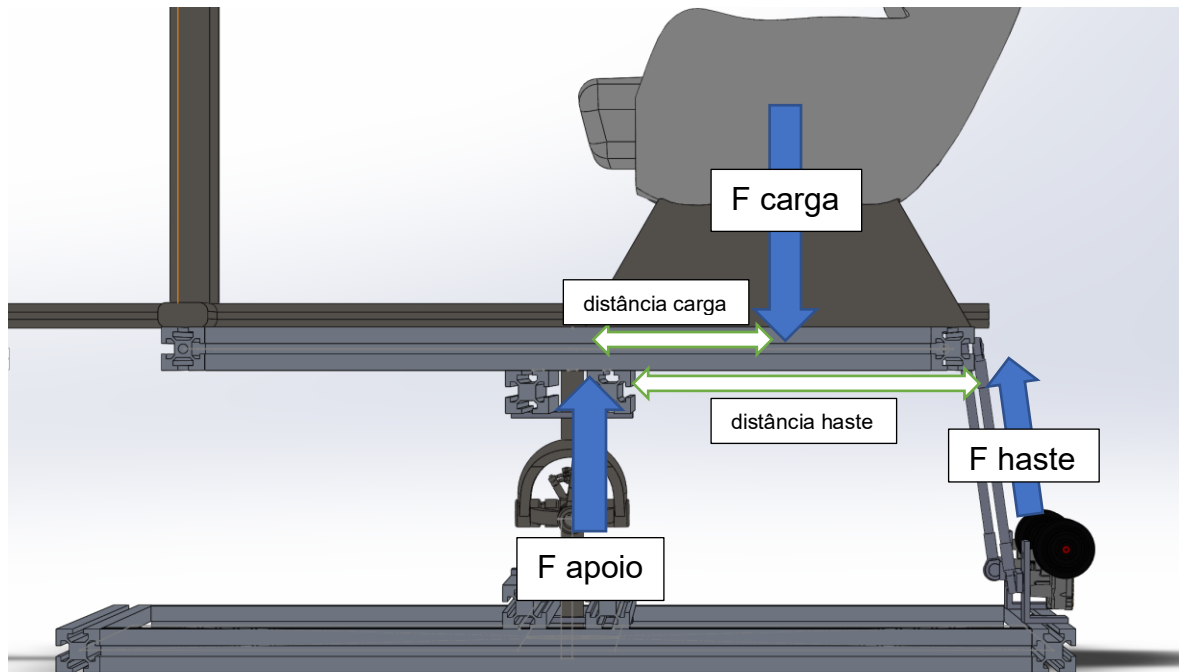
$$F_{apoio} = F_{carga} - (2 \times F_{haste}) \quad (8)$$

$$F_{apoio} = F_{carga} - F_{carga} \times \frac{\text{distancia carga}}{\text{distancia haste}} \quad (9)$$

$$F_{apoio} = F_{carga} \times \left(1 - \frac{\text{distancia carga}}{\text{distancia haste}}\right) \quad (10)$$

$$F_{apoio} = 1300 \times \left(1 - \frac{0,15}{0,344}\right) = 733,1 \text{ N} \quad (11)$$

Figura 18 - Forças presentes na estrutura



Fonte: Elaboração própria

Como tem-se F_{haste} , é possível calcular o torque necessário em cada motor para uma situação crítica, ou seja, maior carga possível em um dos motores, como ilustrado na Figura 19.

Considerando que o motor não está na posição horizontal, a força perpendicular até o braço de alavanca do motor é maior que a força que a haste faz, essa força será proporcional ao seno do ângulo. Por trigonometria, chegou-se até a seguinte equação:

$$\cos \emptyset = \frac{F_{haste}}{F_{motor}} \quad (12)$$

$$F_{motor} = \frac{F_{haste}}{\cos \emptyset} \quad (13)$$

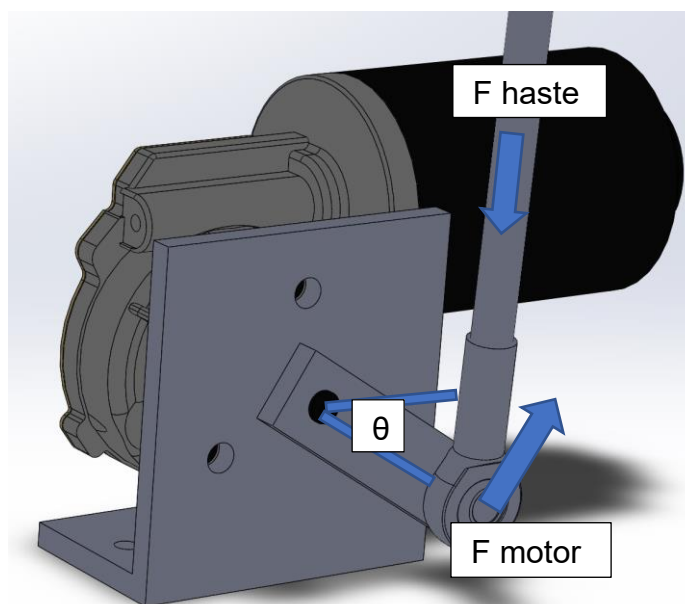
Desta feita, basta utilizar a equação do torque, substituindo F_{motor} calculado acima.

$$T_{motor} = F_{motor} \times \text{comprimento braço de alavanca} \quad (14)$$

$$T_{motor} = \frac{F_{haste}}{\cos \emptyset} \times \text{comprimento braço de alavanca} \quad (15)$$

$$T_{motor} = \frac{283,4}{\cos 80} \times 0,03 = 49,0 \text{ N.m} \quad (16)$$

Figura 19 - Ângulos e forças para os cálculos do motor



Fonte: Elaboração própria

3.2.4 Estrutura Mecânica

Para execução do protótipo mecânico haviam aproximadamente dois ou três meses disponíveis, incluindo neste período a compra dos materiais, a fabricação das peças necessárias e a montagem. Observando esse prazo, e com a carga estimada de 1300 N que a estrutura teria de suportar, obteve-se duas alternativas principais, sendo a utilização de perfil de alumínio estrutural, ou a utilização de tubos quadrados de aço. Ambas as alternativas atenderiam dos requisitos, e cada uma tem seus pontos fortes e fracos como é possível observar na tabela a seguir:

Tabela 2 – Parâmetros relacionados aos materiais utilizáveis na estrutura

Escolha do material da estrutura			
Material	Custo/Metro	Tempo e dificuldade de montagem	Facilidade de modificação
Perfil de alumínio estrutural	R\$ 45,00	x2	Fácil
Tubo quadrado de aço	R\$ 15,00	x8	Muito difícil

Fonte: Elaboração própria

Com base no acima exposto, foi escolhido o perfil de alumínio de 40x40 mm para ser utilizado como estrutura, devido a facilidade para montagem e adaptação, sendo que com o tubo quadrado seria necessário fazer a estrutura toda soldada, o que demandaria muito mais tempo de trabalho e não deixaria possibilidades para modificações no protótipo.

3.2.5 Apoio central

Tendo em vista que foi escolhido um simulador de dois graus de liberdade, o apoio central somente necessitaria fazer os movimentos de *Roll* e *Pitch*. Foram encontrados dois componentes com essa movimentação a um preço razoável, a junta homocinética e a cruzeta. Contudo, ao verificar a disponibilidade de ambos, percebeu-se que a junta homocinética é encontrada com mais facilidade e com um preço abaixo do outro componente, além de ser de fácil adaptação. No entanto ambos atendem ao requisito em termos de movimentação e força suportada.

Figura 20 - Homocinética



Fonte: Adaptado de ARNALDO; ANTUNES; CESARIM

3.2.6 Juntas Secundárias

As juntas secundárias, responsáveis por transmitir o movimento do motor para a estrutura, também necessitam de um movimento em dois eixos. Mas, apesar disso,

a escolha é direta, visto que há uma solução imediata e com baixo custo, que são os terminais rotulares, de fácil adaptação e montagem e são amplamente utilizados em simuladores.

Figura 21 - Terminal rotular



Fonte: Adaptado de FEMASO

3.3 Projeto Eletrônico

Nessa seção são descritos o projeto eletrônico e os componentes principais que o compõe.

3.3.1 Motores e drivers

Como já foi obtido um requisito de torque necessário para o motor, foi possível escolher entre um servo motor e um motor DC, sendo que caso fosse escolhido motor DC, seria necessário um *encoder* para fechar a malha de controle e uma redução. Para todas as soluções possíveis foi feita uma análise, através da Tabela 3, a qual contempla a solução completa para deixar o sistema funcionando em cada alternativa.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na escolha dos motores

Escolha dos motores				
Tipo de motor	Custo	Tempo e dificuldade de implementação	Itens necessários	Custo total
Motor DC com redução	R\$150,00	x7	Driver + Encoder	R\$ 350,00
Servo Motor	R\$2.500,00	x2	Redutor	R\$ 3.000,00

Fonte: Elaboração própria

Devido ao custo dos servos motores, cerca de 10 vezes superior ao de motores DC com redução, não foi possível utilizá-los para essa aplicação. Dito isto, a escolha de motores DC com redução é a única viável.

3.3.2 Controladores

Para fazer o cálculo da movimentação e o controle dos motores é necessário um microcontrolador, visto que ele recebe as informações do jogo, calcula a movimentação dos motores e os movimenta de acordo com os cálculos. Foi necessário que o controlador tivesse no mínimo seis saídas para comandar os *drivers* dos motores e mais quatro entradas para receber o sinal dos *encoders*. Os possíveis controladores foram dispostos na tabela a seguir para comparação e escolha, porém foram descartados os controladores acima de R\$600,00, posto que um dos requisitos é o baixo custo.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados na escolha do controlador

Escolha do controlador			
Controlador	Custo	Tensão das I/O	Itens necessários para compatibilização com outros componentes
Raspberry Zero	R\$ 100,00	3,3 V	Conversor 3,3 V para 5 V
Beaglebone Black	R\$ 300,00	3,3 V	Conversor 3,3 V para 5 V
Esp32	R\$ 40,00	3,3 V	Conversor 3,3 V para 5 V
Arduino Uno	R\$ 25,00	5 V	
Arduino Nano	R\$ 25,00	5 V	Placa de adaptação
Arduino Mega	R\$ 25,00	5 V	

Fonte: Elaboração própria

Todos os controladores possuem um valor econômico aceitável e capacidade de processamento demandada pelo projeto para serem utilizados. Entretanto, foram descartados aqueles que necessitam de um conversor, pois quanto menos partes fossem utilizadas, melhor e mais simples fica a implementação. Com isto, foi escolhido o Arduino UNO, pois já se encontrava disponível e o driver escolhido anteriormente foi feito para o mesmo, não necessitando de cabos ou placas a mais para controlar os motores.

3.3.3 Fonte

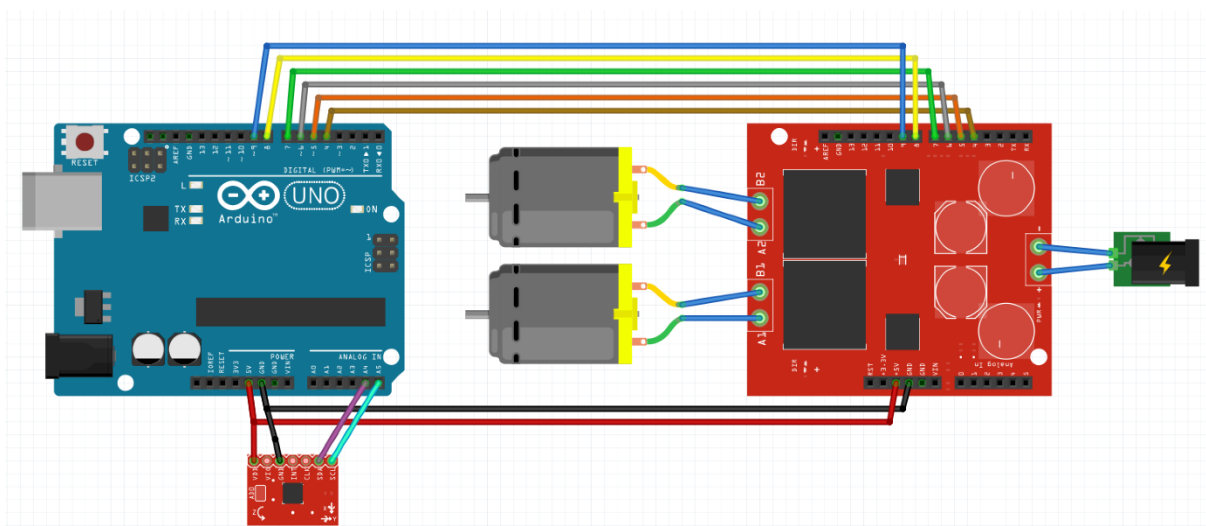
Após a escolha dos motores, foi possível facilmente escolher a fonte. Sendo que a potência dos motores não ultrapassa 600W, foi escolhida uma fonte chaveada de 12V com 50 Amperes.

3.3.4 Interconexão dos componentes

Grande parte dos equipamentos nos dias atuais necessitam de algum tipo de eletrônica embarcada. Muitas vezes é possível utilizar somente circuitos simples, utilizando portas lógicas. Entretanto, no simulador é necessário utilizar um microcontrolador, pois é indispensável receber informações via serial e tomar decisões de acordo com os valores recebidos.

Tendo em vista que o microcontrolador escolhido foi o Arduino, deve-se separar o circuito em duas partes, potência e sinal, como projetado e exibido na Figura 22. O circuito de potência é responsável pelo acionamento dos motores e o circuito de sinal é responsável pelo recebimento dos dados através da serial, e controle dos motores por meio de um driver com duas pontes H.

Figura 22 - Diagrama elétrico



Fonte: Elaboração própria

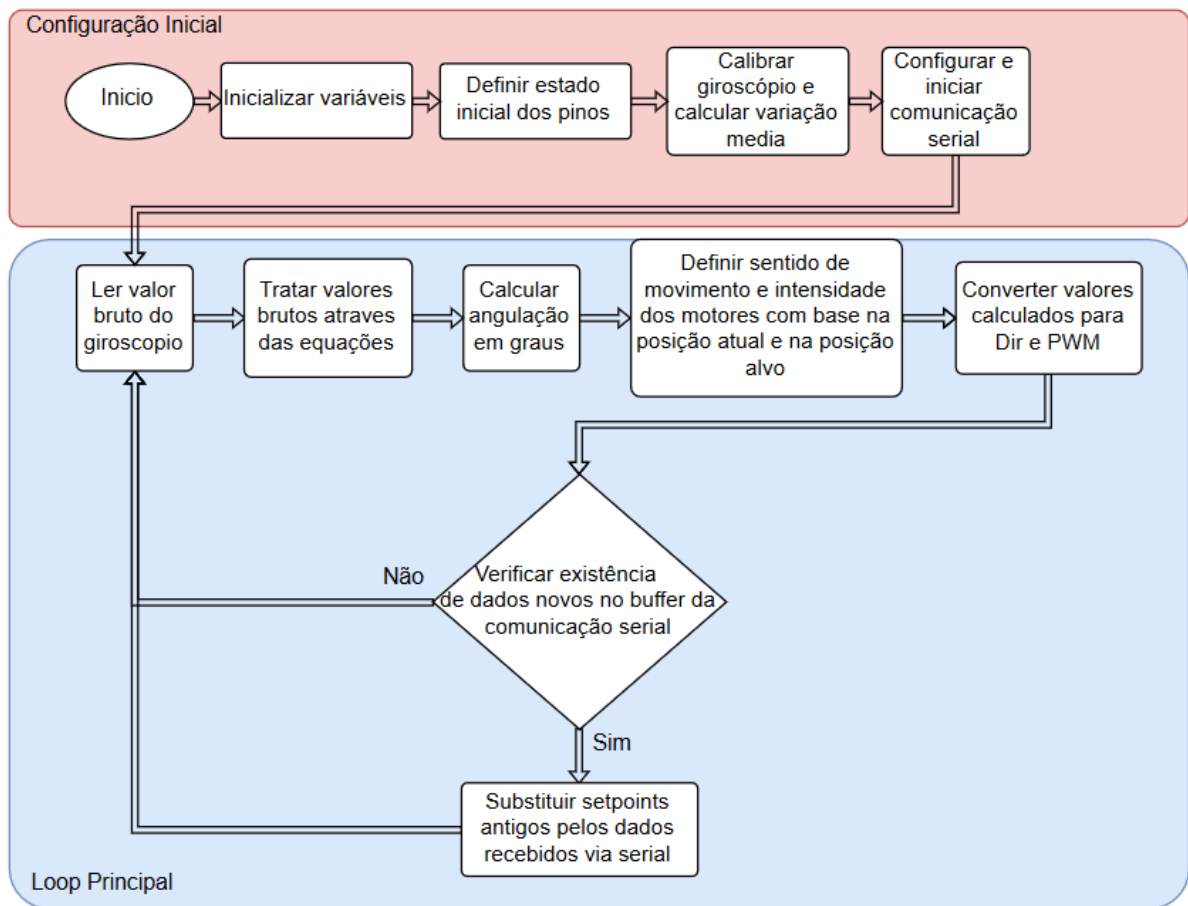
3.4 Projeto de Software

Para programar o microcontrolador, primeiramente é essencial estabelecer um fluxograma a respeito da estrutura do código, para que o mesmo seja desenvolvido de maneira mais rápida e organizada.

A Figura 23 demonstra a lógica do programa com objetivo de controlar os

motores corretamente, consequentemente controlando a estrutura como um todo. Primeiramente é necessário inicializar as variáveis que serão utilizadas, como por exemplo, posição atual, intervalo de tempo desde a última leitura do giroscópio, estado atual dos motores, velocidade e sentido de giro dos motores. Em seguida, será definido os estados iniciais dos pinos de comando, para evitar movimentações indesejadas.

Figura 23 - Fluxograma do software



Fonte: Elaboração própria

Ao utilizar o giroscópio, percebeu-se uma oscilação constante dos valores medidos. Tais oscilações são responsáveis por alterar o valor final do ângulo calculado. Sendo assim, para evitar tal erro de leitura, é necessário calcular a média das variações com o giroscópio em posição estática, para posteriormente subtrair-lo do resultado. Tais cálculos são definidos no fluxograma como *calibração do giroscópio*.

Para dar início ao ciclo principal, primeiramente é necessário adquirir os valores da posição atual da estrutura. Para isso, o giroscópio nos entrega valores em graus/seg., que necessitam ser combinados aos dados do acelerômetro, os quais são medidos em relação a aceleração gravitacional padrão de 1g. Ao atualizar todas as variáveis, é calculado o ângulo que a estrutura está em relação ao solo, utilizando diversas equações para estabilização do valor.

O bloco responsável pelo controle dos motores pode ser dividido em três partes, onde a primeira ocorre a subtração da referência com a posição atual. Com isso tem-se dois valores, um para *Roll* e outro para *Pitch*, os quais servem como entrada para a cadeia de lógica de convenções de acordo com a Tabela 5. Essa cadeia de lógica primeiro define um valor de movimentação para ambos os motores estabilizarem o *Roll*, onde valores positivos são horários e negativos anti-horários. Em seguida define-se dois novos valores para estabilizar o *Pitch*, os quais serão somados aos valores do *Roll*, definindo assim o sentido e intensidade de movimentação dos motores. É importante observar que a intensidade das movimentações é diretamente proporcional a distância entre a posição atual e a referência.

Tabela 5 - Convenções para o software

Convenções de movimentação		
Sentido do movimento	Sentido de giro do motor esquerdo	Sentido de giro motor direito
Direita	Horário	Anti-horário
Esquerda	Anti-horário	Horário
Frente	Horário	Horário
Traz	Anti-horário	Anti-horário

Fonte: Elaboração própria

A partir deste ponto, os valores calculados anteriormente são facilmente convertidos em movimento nos motores. Ao final de todo o ciclo, ocorre a atualização das novas posições alvo, iniciando-o novamente na tentativa de estabilizar o sistema.

3.5 Montagens

Nesta seção é realizada a descrição de como foi feita a montagem do projeto e suas subdivisões.

3.5.1 Montagem Mecânica

Na Figura 24 são apresentados os principais materiais que foram utilizados para construção do protótipo. O primeiro passo foi a montagem de ambas as bases principais, a base de apoio a toda a estrutura, e a base para acoplamento da estrutura de que acomoda o usuário.

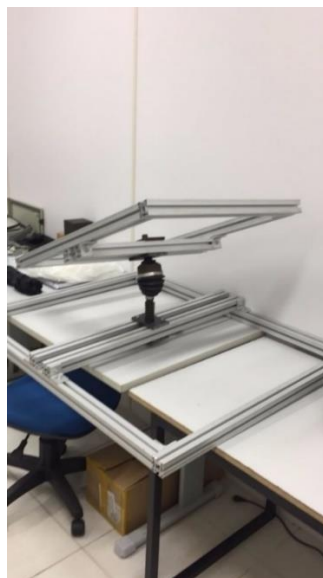
Figura 24 - Materiais comprados



Fonte: Elaboração própria

Como previsto anteriormente no projeto mecânico, foram fabricadas as peças necessárias para a fixação da homocinética e dos motores, além das hastes necessárias para o movimento. Como essas peças não possuem um requisito de precisão muito alto, optou-se por cortá-las na serra fita e fazer as marcações com auxílio do riscador, para furar posteriormente nas furadeiras de bancada. Na Figura 25 é apresentada a estrutura montada.

Figura 25 - Montagem da estrutura



Fonte: Elaboração própria

Após todos os componentes serem fabricados, fez-se a montagem dos componentes na estrutura para analisar possíveis problemas de fabricação. Após as análises iniciais, foram feitos testes de carga sobre a estrutura, simulando a movimentação com um usuário.

Com o auxílio dos técnicos do MOP, foi feita a soldagem da homocinética em seu mancal fixo, pois verificou-se nos testes que a carga sobre ela é considerável ao ponto de movimentar indevidamente no mancal durante movimentos rápidos. A realização deste trabalho é apresentada na Figura 26.

Figura 26 - Solda da homocinética



Fonte: Elaboração própria

Após a montagem de todos os componentes, foi fixado um assento cedido pelo professor responsável pelo carro elétrico do IFSC. Este acento foi utilizado para os testes de movimentação. A montagem mecânica final é apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Montagem mecânica final



Fonte: Elaboração própria

3.5.2 Montagem Eletrônica

Foi escolhido utilizar um giroscópio com acelerômetro na tentativa de substituir os *encoders*, pois tinha-se disponível um compatível com a tensão de operação do Arduino, facilitando a aquisição dos sinais.

A escolha dos componentes na fase de projeto facilitou a implementação do sistema eletrônico, pois não houve a necessidade de conversores de tensão, ou qualquer outro dispositivo para adaptação.

Após a montagem do circuito eletrônico foram fixados todos os componentes na estrutura para realizar a programação do microcontrolador, com auxílio da plataforma de testes já completa exibida na Figura 28.

Figura 28 - Montagem final



Fonte: Elaboração própria

3.5.3 Programação

Durante a implementação do software, notou-se que o giroscópio não é tão eficiente quanto os *encoders*, devido a constantes variações nas leituras, as quais necessitam ser tratadas após a aquisição. Como ambos os motores interferem no *Roll* e *Pitch* ao mesmo tempo, não sendo viável definir uma equação que compreenda a movimentação do sistema para calcular um controlador PID, pois trata-se de um sistema de múltiplas variáveis, tornando-se muito complexo para ser utilizado no período de tempo disponível. Dito isto, foi necessário estabelecer algumas convenções sobre o sentido de giro do motor, de maneira a não utilizar um PID de tamanha complexidade, as quais estão relacionadas com a posição atual e a posição desejada da estrutura.

Outro contratempo encontrado foi com relação as folgas provenientes da estrutura mecânica. Foi necessário utilizar uma variável semelhante ao integrador de um controle PID, a qual define um *range* aceitável de variação. Esta variável é utilizada para manter a estrutura dentro de limites ao redor do *setpoint*, o que ocasionalmente

causa movimentos espontâneos dentro da faixa desejada, pois, a redução dos motores não consegue manter-se estática sob muita carga.

Outra necessidade de implementação foi manter uma variável cuja função é similar a ação do proporcional de um controlador PID. Esta variável é ajustada de acordo com a carga total da estrutura, pois quanto maior a carga, maior o PWM a ser aplicado para que o motor se movimente.

Com objetivo de ajustar os parâmetros citados, foram feitos diversos testes com a estrutura sem carga, para facilitar o ajuste. Com base nos conhecimentos adquiridos de controle PID sobre a função de cada parâmetro na estabilização do sistema, fez-se uma analogia com os parâmetros criados, os quais se comportaram similarmente aos de um PID padrão.

Após ajustar os parâmetros para um sistema sem carga, foi adicionado um usuário de peso considerado médio, aproximadamente 70 Kg, com objetivo de ajustar novamente os parâmetros, para que o protótipo pudesse ser utilizado para seu propósito final.

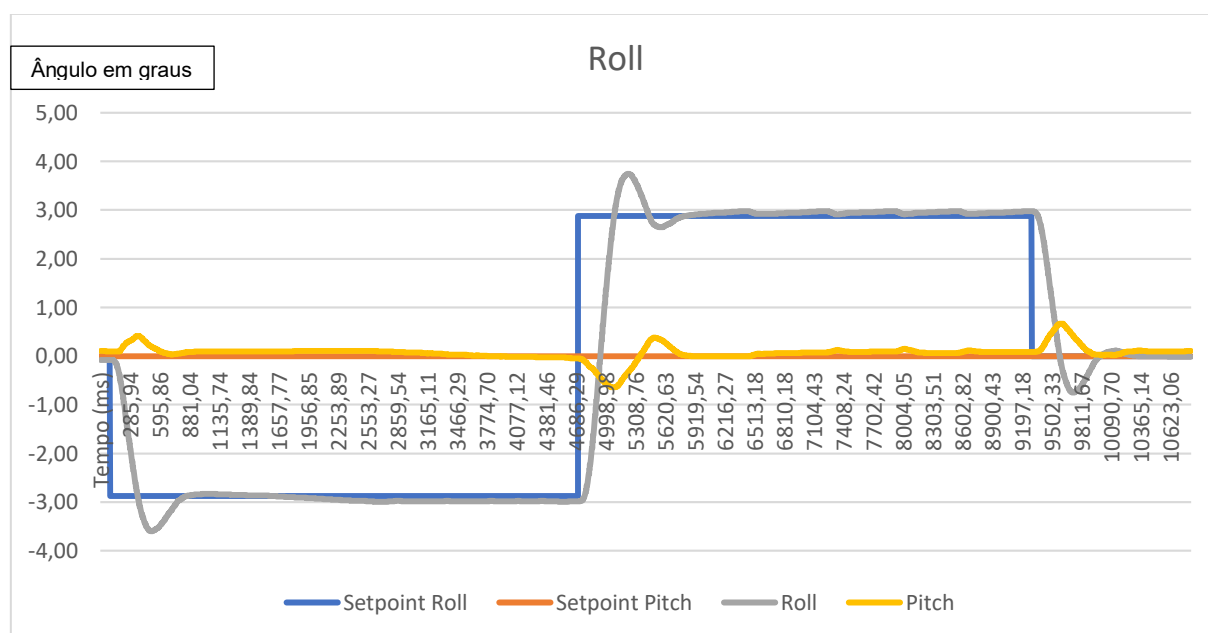
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para avaliar a efetividade do protótipo implementado na simulação de movimentação, inicialmente realizou-se um teste. Neste teste quantitativo, valores de referência foram enviados ao sistema através de comunicação serial. Fazendo uso de um giroscópio foi possível estimar a posição atual do simulador após atuação.

Desta forma toda a movimentação foi analisada, incluindo o tempo de estabilização, tempo de resposta e o ângulo final atingido, verificando o erro entre a referência e a posição final.

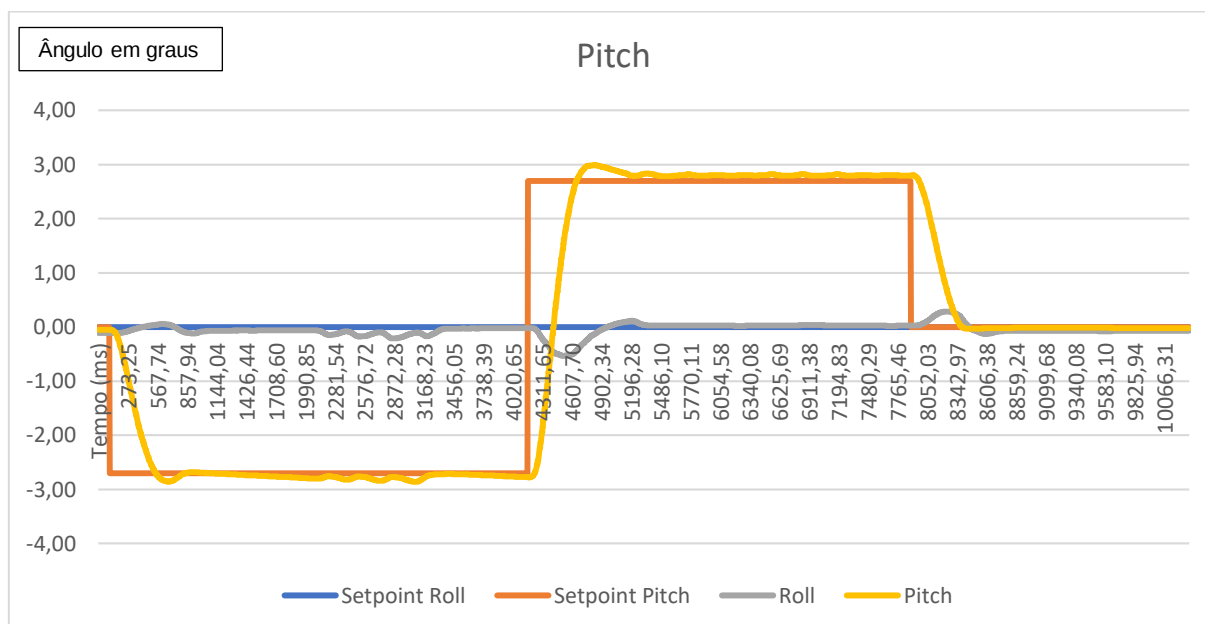
Foram feitas quatro movimentações ao longo de um intervalo de tempo, como pode-se analisar na Figura 29 e Figura 30. A referência inicia em zero graus, é definido para o valor de angulação mínima, permanecendo neste valor por um dado intervalo de tempo. Em seguida, a referência é alterada do valor mínimo ao valor máximo, e novamente permanece neste segundo por um dado intervalo de tempo. Finalmente, a referência é definida como zero.

Figura 29 – Ângulo ao redor de X (graus) x Tempo (milissegundos)



Fonte: Elaboração própria

Figura 30 - Ângulo ao redor de Y (graus) x Tempo (milissegundos)



Fonte: Elaboração própria

Através da análise dos gráficos apresentados, é possível perceber que partindo de zero graus, o sistema está atingindo seu *setpoint* de -2,8 graus em aproximadamente 700ms. O mesmo tempo de aproximadamente 700ms também ocorre quando o movimento parte de -2,8 graus e tem como *setpoint* 2,8 graus, que é a amplitude máxima de movimento em ambos A e B.

O erro máximo de posicionamento do controlador obtido na avaliação é de 0,12 graus de acordo com o valor lido no giroscópio. Porém, é importante observar que não foi feita uma calibração de grande exatidão neste sensor.

Após a coleta de dados, o protótipo foi testado por diversos estudantes do IFSC, onde foram levantados pontos positivos e negativos com relação ao simulador. Na Figura 31 é apresentada a utilização pelo autor.

Figura 31 - Testes do Simulador



Fonte - Elaboração própria

Com relação ao protótipo, todos os estudantes ficaram satisfeitos com o tempo de resposta e com a amplitude de movimentação, muitos ficaram surpresos ao serem informados que a amplitude real de movimentação é de ± 3 graus. Alguns deles questionaram sobre uma instabilidade que ocorre quando não há movimento, tal instabilidade ocorre devido à falta de informações sobre a posição atual dos motores, devido ao uso do giroscópio. Quando o sistema tenta compensar uma variação inesperada de posição, há a necessidade de movimentar ambos os motores, criando uma instabilidade devido à força externa aplicada. Apesar disso, nenhum dos estudantes comentou sobre o erro de posicionamento demonstrado na Figura 29 e Figura 30, o que nos leva a concluir que ele não é relevante para o protótipo.

5 CONCLUSÃO

Após o término do projeto, verificou-se que grande parte dos requisitos traçados inicialmente foram completamente alcançados, sendo eles:

- Transformar os parâmetros de força e orientação extraídos de jogos comerciais em movimentação condizente com a representação virtual do veículo;
- Simular a orientação dos veículos;
- Simular as forças atuantes nos veículos;
- Empregar o valor máximo de R\$ 1500,00 em materiais.

Dentre os requisitos que foram alcançados parcialmente estão:

- Suportar uma carga máxima de 130 kg (20 kg estrutura + 110 kg usuário)
- Alcançar uma amplitude de movimento de ± 5 graus.

Com relação a carga máxima, foram realizados testes com usuários de aproximadamente 120 kg. Porém após alguns minutos de teste um dos motores cessa sua movimentação, o que acredita-se ser provocado por um defeito em uma das pontes H do driver. Tal problema poderia ser solucionado ao se repor o driver defeituoso, ou utilizar duas pontes H em paralelo para aliviar a carga em ambas.

Conseguiu-se alcançar individualmente uma amplitude de movimentação de ± 5 graus, porém para movimentações em conjunto só é possível alcançar ± 3 graus de amplitude em ambos os eixos simultaneamente.

Não houve tempo para os testes utilizando os equipamentos de jogos de corrida, como volante e pedais. Porém tais testes não têm grande nível de dificuldade quando comparados com os desafios ultrapassados durante o desenvolvimento do protótipo.

Os componentes empregados mostraram-se de maneira geral efetivos. Porém, em trabalhos futuros, não será utilizado um giroscópio para este tipo de aplicação, devido a diversas instabilidades e dificuldades enfrentadas com ele. Ainda, recomenda-se a troca de alguns deles, como controladores e sensores, por

componentes de maior qualidade, com possibilidade de adição de mais recursos visuais objetivando facilitar a configuração inicial e interface com usuário, melhorando a qualidade do protótipo em geral.

6 REFERÊNCIAS

ANTUNES, Rodrigo dos Santos; Arnaldo, Felipe Muniz; Casarim, Eduardo. **Análise do semieixo homocinético utilizado no veículo Baja da equipe Clarengex e proposta de melhoria para o sistema.** Ling. Acadêmica, Batatais, v. 6, n. 1, p. 27-44, jan./jun. 2016.

CADOZ, Claude. **A realidade virtual.** Instituto Piaget, 1996.

DOF REALITY. Disponível em: <<https://dofreality.com/motion-simulator-overview/>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

FEMASO. Disponível em: <<http://www.femaso.com.br>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

G FORCE FACTORY. Disponível em: <<https://www.gforcefactory.com/>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

GUERRA, Antônio Bento Penido. **Estudo de falha estrutural em uma plataforma Stewart.** Monografia. 2016.

IFSC. **Manual de comunicação científica.** 2016. Disponível em: <http://www.ifsc.edu.br/documents/30725/188971/IFSC_manual_comunicacao_cientifica_maio_2016.pdf/58c017ce-c9e1-e36f-03b7-ea26b58f7d97>. Acesso em: 04 jun. 2018.

LACERDA, Joel. **Estudo de uma estrutura com três graus de liberdade.** Tese (mestrado), 1997.

LOGITECH. Disponível em: <<https://www.logitech.com>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

MOTION FOR SIMULATORS. Disponível em: <motionforsimulators.com>. Acesso em: 02 mai. 2018.

MOTION-SIM. Disponível em: <<https://www.motion-sim.cz/new/?page=home&article=7&menu=31>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4, 2013. Disponível em: <<https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

NETTO, Antônio Valério; Machado, Liliane dos Santos; Oliveira, Maria Cristina F. **Realidade Virtual - Fundamentos e Aplicações.** Visual Books, 2002.

NETTO, Antônio Valério; Machado, Liliane dos Santos; Oliveira, Maria Cristina F. **Realidade Virtual - Definições, Dispositivos e Aplicações.** Disponível em: <http://www.di.ufpb.br/liliane/publicacoes/2002_reic.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2018.

OCULUS. Disponível em: <<https://www.oculus.com/>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

SAITEK. Disponível em: <<http://www.saitek.com/>>. Acesso em: 02 mai. 2018

SFFAIR, João Pedro Valentini. **Simulador de veículo para ambiente virtual.** Monografia, 2009.

SIMXPERIENCE. Disponível em: <<http://simxperience.com/en-us/products/motionsimulatorkits/stage1motionsimulatorkit.aspx>>. Acesso em: 02 mai. 2018