



Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Engenharia Automotiva, Engenharia Eletrônica, Engenharia de
Energia e Engenharia de Software

KIT DE AUTOMAÇÃO DE CADEIRAS DE RÓDAS

Autor: Grupo Cadeira de rodas automatizada

Orientador: Professores Orientadores da Matéria

Brasília, DF

2015



Grupo Cadeira de rodas automatizada

KIT DE AUTOMAÇÃO DE CADEIRAS DE RODAS

Relatório para matéria do curso de graduação de Engenharias, Projeto Integrador 2

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Professores Orientadores da Matéria

Coorientador: Professores Orientadores da Matéria

Brasília, DF

2015

"A deficiência não precisa ser um obstáculo para o sucesso."

Professor Stephen W Hawking

Orientadores

| Nome orientador | Engenharia |
|---------------------------------|-------------------------|
| Luiz Carlos Gadelha de Souza | Engenharia Aeroespacial |
| Alessandro Borges de Sousa | Engenharia Automotiva |
| Edson Mintsu Hung | Engenharia Eletrônica |
| Jungpyo Lee | Engenharia de Energia |
| Paulo Roberto Miranda Meirelles | Engenharia de Software |
| Ricardo Matos Chaim | Engenharia de Software |

Membros

| Nome Aluno | Matricula | Engenharia |
|----------------------------------|------------|------------|
| Carlos Filipe de Queiroz Araujo | 10/0096093 | Automotiva |
| Edward Douglas M. Pereira Junior | 10/0028349 | Automotiva |
| Felipe Duerno do Couto Almeida | 11/0116712 | Eletrônica |
| Gustavo Vinicius Martins Arvelos | 09/0115830 | Eletrônica |
| Henrique Berilli Silva Mendes | 11/0120841 | Eletrônica |
| Luiz Cláudio Percy | 10/46497 | Eletrônica |
| Bruno Carlos dos S. Moraes | 10/43854 | Energia |
| Bruno Lossio | 10/0095208 | Energia |
| Felipe de Souza Campos | 10/0054323 | Energia |
| Jéssica Rocha Gama | 10/0054501 | Energia |
| Rafael Ferrato | 10/0120491 | Energia |
| Thabata Helen Macedo Granja | 09/0139658 | Software |
| Victor Cotrim de Lima | 09/0134699 | Software |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|---------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AC | Corrente Alternada |
| AD | Analógico Digital |
| AISI | American Iron and Steel Institute |
| BDD | Behaviour Driven Development |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CM | Centro de Massa |
| CRM | Cadeira de Rodas Manual |
| DC | Corrente Contínua |
| DESID | Departamento de Economia da Saúde, Investimento e Desenvolvimento |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| EAP | Estrutura Analítica do Projeto |
| GNU | GNU is Not Unix |
| GPIO | General Purpose Input/Output |
| GPU | Graphics Processing Unit |
| HDMI | High-Definition Multimedia Interface |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IDE | Integrated Development Environment |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| LED | Light Emitter Diode |
| MS | Ministério da Saúde |
| NBR | Norma Brasileira |

| | |
|----------|---|
| NiCd | Níquel Cadmio |
| PCB | Placa de Circuito Impresso |
| PVC | Polyvinyl Chloride |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| RAM | Random Access Memory |
| RPM | Rotações por Minuto |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| SLA | Bateria Selada Chumbo-Ácido |
| SSH | Secure Shell |
| TDD | Test-driven development |
| UART | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter |
| UnB | Universidade de Brasília |
| USB | Universal Serial Bus |
| V_D | Tensão Dreno |
| V_G | Tensão Gate |
| V_S | Tensão Source |
| V_{th} | Tensão de Threshold |
| VPN | Virtual Private Network |
| XP | Extreme Programming |

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | Estado Técnico | 11 |
| 1.1.1 | História | 11 |
| 1.1.2 | O Estado da Arte | 12 |
| 1.2 | Objetivos | 14 |
| 1.2.1 | Objetivos Gerais | 14 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 14 |
| 1.3 | Requisitos | 15 |
| 1.3.1 | Requisitos em Relação à Estrutura | 15 |
| 1.3.2 | Requisitos em Relação às Tecnologias | 16 |
| 1.3.3 | Requisitos em Relação à Parte Financeira | 16 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 17 |
| 2.1 | Estrutura | 17 |
| 2.2 | <i>Power Train</i> | 19 |
| 2.2.1 | Motor Elétrico | 20 |
| 2.2.1.1 | Motor de Corrente Contínua | 20 |
| 2.2.2 | Redutor | 21 |
| 2.2.3 | Bateria | 22 |
| 2.2.3.1 | Carregando baterias | 23 |
| 2.3 | Controle | 23 |
| 2.3.1 | Dispositivos de controle | 24 |
| 2.3.2 | Tecnologias | 24 |
| 2.3.2.1 | Raspberry PI | 24 |
| 2.3.2.2 | Python | 26 |
| 2.3.2.3 | Ambiente de desenvolvimento | 26 |
| 2.3.2.4 | Arquitetura | 26 |
| 2.3.2.5 | Controle do motor | 26 |
| 3 | METODOLOGIA | 31 |
| 3.1 | Estrutura | 31 |
| 3.2 | Power Train | 31 |
| 3.3 | Controle | 31 |
| 3.4 | Metodologia de organização e monitoramento | 32 |
| 3.5 | Integração entre Engenharias | 33 |

| | | |
|------------|--------------------------------|-----------|
| 4 | RESULTADOS | 37 |
| 4.1 | Estrutura | 37 |
| 4.1.1 | Protótipo | 38 |
| 4.1.2 | Esforços Estruturais | 40 |
| 4.1.3 | Centro de Massa | 41 |
| 4.2 | Power-Train | 42 |
| 4.2.1 | Resistência a Rolagem | 42 |
| 4.2.2 | Motoredutor | 45 |
| 4.2.3 | Bateria | 46 |
| 4.2.3.1 | Autonomia | 46 |
| 4.3 | Controle | 48 |
| 4.3.1 | Panorama atual | 48 |
| 4.3.2 | Joystick | 48 |
| 4.3.3 | Controlador Central | 50 |
| 4.3.4 | Motor | 53 |
| 4.3.5 | Integração Motor e Joystick | 54 |
| 4.3.6 | Ponte H | 55 |
| 4.3.7 | Dissipador de calor | 59 |
| 4.3.8 | Indicador de Nível de Bateria | 61 |
| 5 | PLANEJAMENTO FINANCEIRO | 63 |
| 5.1 | Arrecadação | 63 |
| 5.2 | Planejamento de Gastos | 63 |
| 6 | PROBLEMAS ENCONTRADOS | 67 |
| 6.1 | Geral | 67 |
| 6.2 | Controle | 67 |
| 6.2.1 | Ambiente de Desenvolvimento | 68 |
| 6.2.2 | Ambiente físico | 69 |
| 6.2.3 | Arquitetura | 70 |
| 6.2.4 | Ponte H | 70 |
| 6.2.5 | Joystick | 71 |
| 6.3 | Power Train | 72 |
| 6.4 | Estrutura | 73 |
| | REFERÊNCIAS | 75 |

| | |
|--|-----------|
| APÊNDICES | 79 |
| APÊNDICE A – SPRINTS REALIZADAS | 81 |

1 Introdução

A cadeira de rodas manual (CRM) é um importante instrumento para a funcionalidade diária na vida daqueles que tem os membros inferiores comprometidos. Segundo uma pesquisa realizada em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) existe cerca de 4,4 milhões de indivíduos incapazes ou com grandes dificuldades de locomoção em todo o Brasil ((SDH/PR), 2012), cadeirantes, em sua maioria.

Segundo (Júnior et al., 2012) as CRM são consideradas meios de locomoção de baixa eficiência mecânica (2 a 10%), além disso os membros superiores não foram preparados para fazerem tantos esforços e movimentos repetidos. Para indivíduos que ainda estão em fase de adaptação esse esforço é ainda maior e para aqueles com sobrepeso os problemas de sobrecarga podem ser tão sérios quanto os riscos cardiovasculares.

Na busca de aumentar a do indivíduo, a cadeira de rodas elétrica surgiu para oferecer a ele maior facilidade e eficácia no deslocamento. Nesse âmbito, nos últimos anos projetos de automação de cadeiras de rodas manuais (LOCKTON, 2004), (FILHO et al., 2010), (EVEREST; JENNINGS, 1937), (HAMANAKA, 2002) vem sido testados, estes dão ao cadeirante a facilidade de mobilidade e ao mesmo tempo utilizam-se do fato de que a cadeira de rodas manual já está com a ergonomia adaptada as necessidades do indivíduo.

Dessa forma, diante da importância entre a relação homem/cadeira de rodas o presente trabalho tem como objetivo prototipar um kit de automação de cadeira de rodas que seja acoplável às cadeiras de rodas regulamentadas pela NBR 9050 (ABNT, 2004) e as dimensões do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) (INMETRO, 2015).

1.1 Estado Técnico

1.1.1 História

O primeiro meio de suporte para pessoas doentes ou deficientes, possivelmente foi a maca, que foi inventada por volta 4000 a.C. Ela era leve e podia ser facilmente transportada pelos escravos, servos ou membros da família (SOUZA, 2011).

Uma cama de criança, retratada em um vaso grego do século VI a.C., pode ser considerada a mais antiga representação de um veículo sobre roda em ambientes internos. Uma escultura feita mil anos após o vaso, pode ser considerada a mais antiga representação de uma cadeira de rodas. Acredita-se que a escultura venha da China, sendo o único país

da metade oriental da Ásia em que as cadeiras foram usadas antes dos tempos modernos (SOUZA, 2011).

Por volta do século XVI, algumas cadeiras receberam pequenas rodas ou rolos, dando comodidade aos idosos e doentes, onde essas cadeiras tinham as costas reclináveis, apoio de cabeça e apoio de braço. Com a criação dessas cadeiras, os idosos e doentes não precisavam ficar confinados nas camas. Muitas dessas cadeiras eram feitas individualmente e para a própria utilização do dono (SOUZA, 2011).

Com o passar do tempo, cresceu o desejo pelo conforto, com isso, foram feitas algumas alterações nos contornos das cadeiras, elas passaram a receber braços adaptados às formas do corpo humano. Entretanto, as cadeiras de rodas ainda precisavam de alguma pessoa para empurrar. Uma das últimas melhorias que foi aplicada às cadeiras de rodas, foi no final do século XIX, quando as rodas de bicicletas de madeira foram substituídas por raios de metais, deixando-as bem parecidas com as que usamos hoje em dia. Um pouco mais tarde, quando as rodas de bicicletas foram envoltas com pneu de borracha, os fabricantes das cadeiras de rodas começaram a seguir essa tendência (SOUZA, 2011).

No início do século XX, o inventor americano George Westinghouse, fez alguns desenhos sobre suas idéias para a criação de uma cadeira de rodas elétrica. Entretanto, ele faleceu em 1914 sem ter construído uma cadeira de rodas elétrica, apesar disso, muitos o consideram como o inventor. Alguns anos depois, um grupo de engenheiros criou uma cadeira de rodas motorizada, entretanto, esta era muito cara, pesada e inflexível para os consumidores (CLARK, 1997), (SHEPARD; KAREN, 1984). Já no início da década de 1930, Harry Jennings projetou uma cadeira de rodas dobrável com a ajuda de um paraplégico, o que acabou melhorando os modelos seguintes das cadeiras de rodas elétricas (CLARK, 1997), (SHEPARD; KAREN, 1984).

De acordo com a necessidade e avanço científico e tecnológico do ser humano as cadeiras de rodas se tornaram um novo produto. Visando o mercado, várias empresas investiram na fabricação e desenvolvimento de modelos e tecnologias, que beneficiam aos cadeirantes. Existem atualmente diversos modelos de cadeiras de roda como cadeiras para banhos, cadeiras automatizadas, cadeiras dobráveis é até mesmo kits de automação, equipamentos que se tornaram de extrema importância para facilitar a acessibilidade dos cadeirantes (BERTONCELLO; GOMES, 2022).

1.1.2 O Estado da Arte

As tecnologias assistivas, que são recursos tecnológicos que facilitam a vida das pessoas com algum tipo de deficiência, tem se tornado hoje um assunto cada vez mais comum. O avanço tecnológico tem facilitado uma inclusão social maior auxiliando atividades como, a automação de ambientes que facilita para a execução de tarefas simples. Na

correção postural, com cadeiras que beneficiam a postura de pessoas que possuem alguma deficiência física. E na locomoção, que podem ser bengalas, cadeiras de rodas manuais ou elétricas, qualquer equipamento ou estratégia que auxilie na mobilidade.

A NBR 9050 recomenda padrões de cadeiras de roda manuais, estabelecendo padrões de estofados, dimensões estruturais, dentre outros que facilitam a vida de pessoas com deficiência (BECKER, 2000).

Hoje em dia, com a tecnologia mais avançada e os estudos em materiais mais resistentes e leves, pode-se observar uma vasta gama de cadeiras de rodas manuais e elétricas. Na figura 1, é apresentada uma cadeira de rodas do modelo stand-up. Seu principal objetivo para o cadeirante é além de melhorar sua auto-estima, facilitar a acessibilidade nas atividades cotidianas, como exemplo, pegar um livro em uma estante, ou simplesmente olhar uma pessoa frente a frente. Isso ocorre devido a cadeira ter um sistema de elevação elétrico ou manual, permitindo pequenos deslocamentos do corpo da pessoa na posição ereta, com segurança e praticidade



Figura 1 – Cadeira Stand-up

Na figura 2, pode ser observado um exemplo de cadeira de rodas para desporto. Esse tipo de cadeira de rodas são utilizadas nas atividades desportivas, onde cada cadeira é feita de acordo com a deficiência do para-atleta. Essas cadeiras são feitas com materiais leves, para que o para atleta tenha mais velocidade e mobilidade (FREIRE,



Figura 2 – Cadeira desporto

Outro ramo que tem incentivado bastante pesquisas são os que oferecem automação para CRM. Na figura 3 é apresentado a patente (PI0304753-9), que consiste em um kit para motorização de cadeiras de rodas, em que as rodas são tracionada por um conjunto de rodas menores comandadas por um joystick. Na figura também é possível visualizar a presença de um joystick fixado junto ao apoio de braço. ([HTTP://WWW.PATENTESONLINE.COM.BR](http://www.patentesonline.com.br)

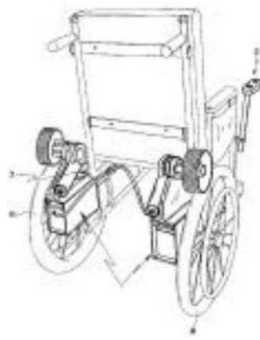


Figura 3 – Patente de um kit de automação de cadeiras de rodas

A idéia dessa patente serviu de inspiração para o desenvolvimento desse projeto, onde a idéia principal é construir um kit para ser acoplado em qualquer cadeira de rodas manual, transformando-a em motorizada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O principal objetivo desse trabalho é desenvolver um kit de automação de cadeira de rodas, que seja portátil e removível.

1.2.2 Objetivos Específicos

O projeto foi dividido em quatro ramos: *power train*; estrutura; controle; e interface com o usuário. Sendo que mesmo com a divisão houve um envolvimento de todas as engenharias (Automotiva, Eletrônica, Energia e *Software*) nos quatro ramos durante toda execução do projeto.

Engenharia Automotiva

1. Criação um design que permita um acoplamento, visando a ergonomia, peso e dimensionamento do sistema de *power train* segundo NBR 9050;
2. Análise de materiais levando em consideração que o produto deve resistir a adversidades como água, sol, calor, etc;
3. Análise de esforços estruturais via critério de Von Misses;
4. Montagem do protótipo funcional;

Engenharia Eletrônica

1. Construção de um sistema automatizado de controle capaz de gerir as funcionalidades do kit de automação;
2. Construção de pontes H que possibilitam o controle de potência e motor;
3. Permissão da interação do usuário com o kit de automação com o uso de periféricos;
4. Auxílio do desenvolvimento e criação de interface com o usuário;

Engenharia de Energia

1. Dimensionamento do motor com o menor requerimento de potência, obtendo uma relação torque-potência considerável para o sistema de tração elétrica;
2. Dimensionamento do redutor, visto que motores elétricos CC não possuem o torque necessário para a movimentação da cadeira;
3. Dimensionamento da bateria visando os requisitos: peso, custo, autonomia e transporte do produto;
4. Desenvolvimento do melhor sistema de acoplamento possível entre o motor e a roda do kit afim de que a transmissão de forças seja a mais eficiente;

Engenharia de *software*

1. Montagem da arquitetura da informação de forma evolutível e escalonável em relação a qualquer código a ser desenvolvido;
2. Teste incremental das unidades de código desenvolvidas, fazendo a utilização de MOCK, quando necessário, diminuindo assim a dependência de outras partes do projeto;
3. Desenvolvimento incremental para que seja possível a integração continua;

1.3 Requisitos

Os requisitos iniciais do projeto foram definidos a fim de facilitar um planejamento na fase inicial, ajudar na definição das tecnologias que foram utilizadas, e gerenciamento do projeto.

1.3.1 Requisitos em Relação à Estrutura

- O sistema de acoplamento entre o kit de automação e a cadeira deve ser universal com base nas dimensões do INMETRO;
- O projeto de design deve ser discreto;
- A ergonomia do kit deve prover conforto e segurança ao usuário;
- Transmissão de torque e potência entre o kit e a roda da cadeira de rodas deve possuir as menores perdas possíveis;
- O peso do conjunto motor-bateria deve ser o menor possível. Esse requisito está também atrelado ao custo- benefício.

1.3.2 Requisitos em Relação às Tecnologias

- É necessário um sistema de automação, controle dos motores, indicadores e controladores de potência;
- Interface com o usuário deve ser simples e acessível;
- A velocidade mínima da comunicação entre interface do usuário e placas de controle deve ser a mais alta possível.

1.3.3 Requisitos em Relação à Parte Financeira

- Os custos totais do protótipo devem ser consideravelmente menores aos de uma cadeira de rodas motorizada;
- Os custo-benefício das peças a serem utilizadas no projeto devem ser embasados em cálculos matemáticos de quantidade-analisada por valor a ser pago.

2 Fundamentação Teórica

As cadeiras de rodas motorizadas proporcionam conforto, segurança, rapidez e prevenção de lesões nos membros superiores devido ao uso repetitivo em cadeiras de rodas manuais. Contudo para a aquisição de uma cadeira de rodas motorizada exija-se um elevado capital inicial de investimento. Em uma análise do impacto orçamentário realizada pelo Departamento de Economia da Saúde, Investimento e Desenvolvimento - Ministério da Saúde-DESID/SE/MS, o preço sugerido para uma cadeira de rodas motorizada é de R\$ 4.999,00, além do custo de manutenção ([CONITEC, 8 de maio de 2013](#)).

Em caso de necessidade, estas cadeiras não podem ser usadas como cadeiras de rodas manuais, pois possuem rodas pequenas para aproveitar melhor a potência dos motores e sistema de transmissão. Outro detalhe importante é que cadeiras de rodas motorizadas são geralmente pesadas e não possuem as facilidades de transportes das cadeiras manuais.

Neste capítulo é apresentada toda a fundamentação teórica utilizada para a criação do produto desenvolvido. Dividido em seções, o capítulo aborda os princípios do *power train* (Alimentação e Motores), controle eletrônico e estrutura do protótipo.

Na seção *power train* são apresentados conceitos relacionados a motores e baterias, já na seção controle são apresentados controladores analógicos de motores (ponte H), interface de controle do usuário, microcontroladores, arquitetura, linguagens de programação, testes de *software* e tecnologias, por fim na seção de estrutura será abordado o material utilizado assim como aspectos gerais relevantes ao funcionamento eficiente do protótipo.

2.1 Estrutura

Liga Metálica

Com o objetivo de confeccionar a estrutura que suportará os motores, baterias e controladores, é necessário observar alguns conceitos dos materiais que são relevantes ao projeto, bem como o custo.

De acordo com a matéria publicada por Infonet, a dureza e resistência da liga deve-se ao enriquecimento superficial nos aços que é suportada por um núcleo tenaz. Sabe-se que vários tipos de aço apresentam boas condições para essa finalidade. Para tanto, deve-se levar em consideração que a cementação exige tratamento térmico relativamente complexo, o que faz com que a escolha do aço não pode ser feita baseada somente na aplicação final do material, mas também levando em conta as condições térmicas que o material irá sofrer ([F., 2014](#)).

Levando em consideração principalmente o aspecto financeiro verificou-se dois tipos de ligas que podem ser utilizadas nesse trabalho: SAE 1020 e SAE 1040. De acordo com a fornecedora de aço Favorit, o aço SAE 1040 apresenta boa resistência mecânica, boa usinabilidade e baixa soldabilidade. Estes aços não apresentam as mesmas características mecânicas e metalúrgicas apresentadas pelos aços especiais, pois em seus processos de fabricação não são controlados o tamanho de grão austenítico, os níveis de gases dissolvidos, o grau de pureza, etc.

As faixas de composições químicas dos aços comerciais são apenas orientadas pela norma NBR 6006 ou pelas normas internacionais tipo SAE, AISI, ou DIN, portanto, não há garantias de que os teores dos elementos químicos principais ou residuais estejam estritamente dentro dos limites especificados por estas normas. Além disto, nos aços comerciais, não são garantidas as faixas de temperabilidade conforme as normas NBR ou SAE (FAVORIT, 2015). Como outra opção, o aço SAE 1020 é um dos aços ao carbono mais utilizado como aço para cementação com excelente relação custo benefício quando comparado com aço para o mesmo propósito (G, 2015).

De acordo com um experimento realizado por Fernando Ickert, através da análise visual das amostras foi possível observar que os materiais que possuem maior ductilidade (aço SAE 1020 e aço SAE 1045), apresentaram escoamento com maior facilidade em relação aos materiais menos dúcteis (aço inoxidável AISI 304). A partir disto, foi possível verificar com maior clareza a propagação da trinca devido à compressão e tração do corpo de prova, ao longo do ensaio até sua ruptura por fadiga, pois as amostras de aço SAE 1020 e aço SAE 1045 apresentaram uma considerável deformação antes de atingir a ruptura, ao contrário do que aconteceu com um material dúctil-frágil no caso do aço inoxidável AISI 304, que não apresentou uma variação visível em sua deformação e acabou rompendo de maneira inesperada (F., 2014).

Conforme a fornecedora de aço Açosport, os aços SAE 1020 são aços carbonos de ligas metálicas constituídas basicamente de ferro, carbono, silício e manganês, apresentando também outros elementos inerentes ao processo de fabricação, em percentuais controlados. O aço carbono SAE 1020 é um dos aços mais utilizados, devido a sua baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade, porém sua usinagem é relativamente pobre. Esse aço é indicado para parafusos, trefilados duros, chassis, discos de roda, peças em geral para máquinas, tubos soldados e veículos submetidos a esforços pequenos e médios. Este tipo de aço é altamente tenaz, particularmente indicado para fabricação de peças que devam receber tratamento superficial para aumento de dureza, principalmente cementação. O aço SAE 1020 é utilizado ainda para eixos em geral, forjados (AÇOSPORT, 2015).

Resistência a Rolagem

Segundo (SILVA, 2009), os fatores que determinam a resistência ao rolamento são:

os coeficientes de atrito das rodas traseiras e dianteiras, o peso total do sistema (cadeira e usuário), a superfície em que a cadeira está sendo impulsionada e a distribuição de peso entre as rodas traseiras e dianteiras através do centro de massa (Cm).

A figura 4 é um diagrama que ilustra as variáveis que determinam a resistência de rolagem da cadeira de rodas manual. Estas variáveis são: o comprimento da roda (dwb), a distância horizontal do eixo das rodas traseiras ao centro de massa (x) e a distância horizontal do eixo das rodas dianteiras ao centro de massa ($dwb-x$).

As forças presentes no diagrama representam as forças peso das rodas traseiras (f_r) e das dianteiras (f_c), que fazem parte das forças de resistência ao rolamento: $f_{r,rr}$ das rodas traseiras e $f_{c,rr}$ das rodas dianteiras. Nas equações abaixo: μ é o coeficiente de fricção de rolagem, m é a massa e g é a aceleração da gravidade (SILVA, 2009).

$$f_r = m * g \frac{(dwb - x)}{dwb}; f_{r,rr} = \mu * f_r \quad (2.1)$$

$$f_c = m * g \frac{x}{dwb}; f_{c,rr} = \mu * f_c \quad (2.2)$$

$$f_{rr} = f_{c,rr} + f_{r,rr} \quad (2.3)$$

A resistência ao rolamento f_{rr} é, por fim, a soma das resistências das rodas dianteiras e traseiras.

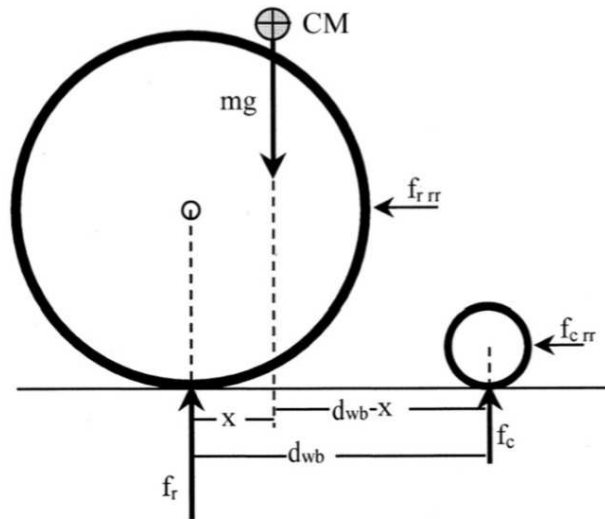


Figura 4 – Diagrama das variáveis que determinam a resistência de rolagem da cadeira de rodas manual. (SILVA, 2009).

2.2 Power Train

Para que a cadeira de rodas se movimente sem o uso de força humana, é preciso de um sistema elétrico capaz de substituir essa ação. Tal sistema deve ser composto por

motores que darão o torque e a força necessária para as rodas da cadeira, e por uma fonte de energia que alimente estes motores, garantindo autonomia eficiente ao sistema, uma bateria, por exemplo.

2.2.1 Motor Elétrico

O motor elétrico é uma máquina que tem a capacidade de transformar energia elétrica em energia mecânica (MEGGIOLARO; GIRAS, 2011). Existem dois tipos de motores elétricos: motor de corrente alternada (CA) e os de corrente contínua (CC).

As cadeiras de rodas elétricas utilizam-se de baterias como fonte de alimentação para os motores, portanto utilizam motores de corrente contínua. Este tipo de motor é muito utilizado em projetos que necessitam de velocidades variáveis, eles também apresentam uma região de torque e potência constante e são simples de realizar a aceleração e a desaceleração (HAMANAKA; DIAS, 2002).

É necessário que as relações de velocidades entre os motores tenham um sistema de controle rígido de forma que o usuário consiga controlar a cadeira adequadamente. Os motores devem responder aos comandos sem que hajam erros por uma questão de segurança. Uma metodologia para o dimensionamento de sistemas de tração para veículos elétricos é baseada na dinâmica veicular e considerando três condições de operação:

- Aceleração inicial
- Velocidade nominal
- Velocidade máxima

Um sistema que supre essas três condições funcionará adequadamente nos demais regimes de operação. Os parâmetros que definem essas restrições são:

- Velocidade nominal do veículo
- Tempo especificado para o veículo atingir a velocidade nominal
- Velocidade máxima
- Massa do veículo

2.2.1.1 Motor de Corrente Contínua

O objetivo é atender as restrições de projeto com o menor requerimento de potência, ou seja, obter um perfil de torque-velocidade ótimo para o sistema de tração elétrica.

Os motores de corrente contínua utilizam-se das forças eletromagnéticas para transformar energia elétrica em mecânica, eles funcionam com uma fonte retificada, ou seja, que possuem polaridade fixa.

Este tipo de motor possui dois terminais, um positivo e outro negativo que de acordo com a polaridade e o sentido da corrente controlam a repulsão dos eletroímãs e consequentemente o sentido da rotação do motor. Desta maneira, este tipo de motor seria capaz mover as rodas tanto para frente quanto para trás, promovendo mobilidade à cadeira de rodas do usuário.

Uma das maiores vantagens dos motores de corrente contínua é o controle da velocidade que é feito por drenagem de corrente para o motor. Porém são mais difíceis de serem construídos e mais propícios a problemas, gerando uma maior manutenção.

Outro problema encontrado é a alta velocidade angular. Motores de corrente contínua encontrados no mercado possuem velocidades angulares nominais entre 2500 e 2800 rpm, o que lhes confere um baixo torque. Cadeiras de rodas precisam de motores que transmitam um alto torque para movimentar suas rodas, assim, se faz necessário um sistema redutor acoplado ao eixo do motor para reduzir a velocidade angular e aumentar o torque.

2.2.2 Redutor

O redutor tem a finalidade de modificar algumas características de ventiladores, bombas e motores elétricos para o acoplamento com outros dispositivos em seus eixos. Desta forma, o uso do redutor irá variar a velocidade, rotação ou torque ([ANDRADE, 2015](#)).

Para que haja uma redução do torque do eixo do dispositivo gerador de energia é necessário que haja a conexão deste com um conjunto de eixos com engrenagens cilíndricas dentadas ou com um parafuso. Por meio destas engrenagens a velocidade de rotação da transmissão é reduzida, e o contato entre engrenagens de menor ou maior número de dentes possibilita a redução de torque desejada, lembrando que a quantidade de dentes depende da variação do diâmetro da engrenagem. A figura 5 representa um motor acoplado a um redutor.

Existem dois tipos principais de redutores, os de engrenagens cilíndricas de dentes retos e os de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais. Os primeiros distinguem-se por transmissão de força sem deslizamento nos dentes que promove segurança de funcionamento, durabilidade, resistência a sobrecargas, fácil manutenção e dimensões reduzidas em relação a potência.

As engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais apresentam a vantagem de terem um funcionamento muito suave. Elas trabalham com relevante escorregamento de

um dente sobre outro. Sua utilização permite transmissões silenciosas, sem vibrações e choques. O número de dentes mínimo pode ser inferior ao das engrenagens cilíndricas de dentes retos, então a relação de transmissão poderá ser maior.



Figura 5 – Motor de corrente contínua acoplado a um redutor

2.2.3 Bateria

Baterias são dispositivos que transformam energia química em elétrica e vice-versa. Por ser um processo reversível, as baterias podem ser carregadas e descarregadas várias vezes. Hoje no mercado existem vários tipos de baterias, com diferentes condições nominais.

A bateria adequada ao projeto seria uma bateria de chumbo ácida, muito utilizada em veículos devido a seu fácil acesso e baixo custo. Atualmente ela já é utilizada em cadeiras de rodas elétricas. Este é o tipo menos eficiente de bateria, com a pior relação peso/energia, mas em compensação é a tecnologia mais barata. Foi inventada em 1859 pelo físico francês Gaston Planté, é muito utilizada hoje em dia em diferentes áreas, como automóveis, sistemas de fornecimento de energia elétrica ininterrupta (*no-breaks*) e cadeiras de rodas elétricas.

Um grande problema foi solucionado na década de 70, onde pesquisadores conseguiram desenvolver uma bateria de chumbo-ácido livre de manutenção, podendo operar em qualquer posição. Nesta bateria, o invólucro foi selado e o eletrólito líquido foi transformado em separadores umedecidos.

As baterias SLA (bateria selada chumbo-ácido), também conhecida como *Gelcell*,

estão livre do famoso efeito memória, na qual estas perdem autonomia conforme a quantidade de ciclos, de carga e recarga. Além disso, deixar a bateria em carga flutuante por um longo período não causa nenhum dano.

A bateria de chumbo-ácido tem a melhor retenção de carga entre todas as baterias recarregáveis. As baterias de SLA descarregam, em média, aproximadamente 40% da sua energia armazenada em 1 ano, já uma de NiCd se auto descarrega na mesma quantidade em 3 meses.

As baterias SLA devem sempre ser armazenadas carregadas. Deixar a bateria descarregada causa sulfatação, uma condição que torna difícil, se não impossível, de se recarregar as baterias. A bateria SLA consegue fornecer entre 200 e 300 ciclos de carga/descarga.

Vantagens:

- A mais barata em termos de custo por Watt hora;
- Segura e durável quando utilizada corretamente;
- Auto descarga está entre as mais baixas entre as baterias com sistema de recarga;
- Não exige muita manutenção e não tem o efeito memória.

Limitações:

- A bateria não pode ser armazenada em completa descarga, a tensão tem de estar acima de 2,10V;
- Densidade baixa da energia;
- Ciclo de carga/descarga limitado;
- O eletrólito e o conteúdo da carga podem causar danos ambientais;
- Imprópria para dispositivos de mão que exigem tamanho compacto.

2.2.3.1 Carregando baterias

O tempo de carga de uma bateria de Chumbo-Ácido (selada) é de 12 a 16 horas. Com correntes de carga maiores, e métodos de carga multi-estágios, o tempo de carga pode ser reduzido para 10 horas ou menos. Durante a carga em corrente constante, a bateria carrega 70% em aproximadamente 5 horas, os 30% restantes são completados por uma lenta carga de pico. A corrente de pico dura outras 5 horas e é essencial para o bem estar da bateria.

2.3 Controle

Desde a primeira patente de cadeira de rodas elétrica em 1937 (EVEREST; JENNINGS, 1937), diversos modelos de cadeiras de rodas motorizadas foram desenvolvidos. As mais diversas interfaces humano-computador foram criadas de modo a facilitar a vida do cadeirante, desde cadeiras elétricas com um joystick simples à cadeiras inteligentes controladas por voz ou sem fio via celular, com monitoramento de velocidade, bateria e inclinação (BARCELOS et al., 2008). Foram pesquisadas várias formas de controle de cadeiras de rodas que podem ser consultados na tabela 1.

| Interface | Comunicação | Monitoramento | Características |
|---------------------------------|--|--|--|
| Joystick tradicional | Sem ou com fio, dependendo da aplicação. | Pouco, geralmente apenas o nível da bateria. | Contém mecanismo para encaixe na cadeira de rodas e ainda botões de emergência, os dados são enviados via bluetooth ou fio para o microcontrolador, onde é feito todo o processamento. |
| Joystick adaptado para o queixo | Com fio. | Nenhum. | Joystick fixo é adaptado para o controle com o queixo, utilizado por tetraplégicos. |
| Guidão e motor dianteiro | Mecânica. | Pouco ou nenhum. | Apenas para motores dianteiros. |

Tabela 1 – Formas de controle

2.3.1 Dispositivos de controle

O *joystick* é um periférico de computador pessoal ou um dispositivo geral de controle que consiste em uma vara vertical na qual os pivôs se aproximam de uma extremidade e transmitem seu ângulo em duas ou três dimensões a um computador (MCGUIRE; JENKINS, 2009). O *joystick*, muito utilizado em computadores e jogos eletrônicos, provou sua utilidade em diversas áreas.

Em uma cadeira de roda elétrica o controle que representa a interface com o usuário, normalmente é feito com sistemas de *joystick*. Essa é uma solução comum devido sua simplicidade, baixo custo e confiabilidade.

Para o projeto, o *joystick* foi conectado com fio em uma posição que o usuário se sinta mais confortável de acordo com as limitações do dispositivo. Este acoplamento deverá ser simples e confiável.

2.3.2 Tecnologias

2.3.2.1 Raspberry PI

O Raspberry Pi é um computador do tamanho de um cartão de crédito que faz uso do sistema operacional Linux. Este sistema foi desenvolvido para rodar aplicações de todos os tipos, como internet, vídeo, dentre outras, que geralmente rodam em um computador pessoal comum. Possui entradas USB que permitem a conexão de periféricos como mouse, teclado, câmeras e saídas para TVs como HDMI. Possui apenas memória volátil, sem disco rígido e roda o sistema operacional a partir de um cartão de memória (RASPEBERRY..., 2015).

O Raspberry Pi tem como principal componente um pequeno circuito integrado que reúne o processador com a arquitetura ARM, a GPU VideoCore IV e a memória RAM que é compatível com o sistema operacional GNU/Linux. As especificações gerais do modelo mais provável a ser utilizado no projeto, o Raspberry Pi modelo B+, que pode ser visto na figura 6, são:

- Processador ARM11 de 700 MHz;
- GPU Dual Core VideoCore IV;
- Memória 512MB SDRAM;
- Saída de vídeo HDMI e RCA;
- Saída de áudio P2;
- Interface de rede Ethernet;
- 4 portas USB 2.0;
- Conector Micro USB para alimentação.

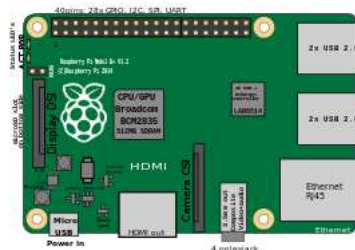


Figura 6 – Raspberry Pi Model B+

Foi utilizada uma tecnologia de conexão remota chamada SSH, que consiste em "um programa utilizado para acessar remotamente máquinas e executar comandos remotamente na máquina acessada" (BSD General Commands Manual, acessado em 22 de Outubro de 2015).

2.3.2.2 Python

Uma das linguagens adotadas foi o Python, devido a facilidade de existir bibliotecas específicas que controlam o GPIO (*General Purpose Input/Output*) do *Raspberry Pi*. Essa linguagem é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada, orientada à objetos, de tipagem dinâmica. Tem uma sintaxe consisa e clara, juntamente com uma biblioteca com recursos poderosos. Os módulos e *frameworks* ainda não foram decididos.

2.3.2.3 Ambiente de desenvolvimento

O ambiente utilizado para desenvolver o *software* relativo ao projeto tem como linguagem de desenvolvimento Python 3.4 e ambiente para testes.

Os testes unitários são utilizados de forma a testar a menor unidade do *software*, de tal forma a suportar a automatização dos mesmos, de forma independente entre os testes (UNITTEST..., 2015a). O *framework* utilizado foi o "unittest", suportado e provido pelo próprio Python.

Foi utilizado o *Mock*, uma biblioteca de teste que faz parte do *framework* "unittest". É utilizada para simular o comportamento de um componente enquanto este não for implementado (UNITTEST..., 2015b).

Foi realizada a cobertura de código, uma métrica quantitativa de qualidade utilizada para aferir a quantidade percentual de teste do *software*, mostrando assim a efetividade dos testes realizados, artifício esse que se torna indispensável quando utiliza-se testes unitários, pois proporciona um retorno da medida da eficácia.

2.3.2.4 Arquitetura

"É um conjunto de elementos arquiteturais (de dados, de processamento, de conexão) que possuem alguma organização. Os elementos e sua organização são definidos por decisões tomadas para satisfazer objetivos e restrições" (WOLF(92), 2015).

2.3.2.5 Controle do motor

Geralmente motores precisam de corrente relativamente altas para controlar o seu funcionamento, assim é necessário que o sistema seja capaz de drenar corrente suficiente para os dispositivos. Considerando a característica dos motores de corrente contínua, sua direção é controlada pelo sentido da corrente, pode-se construir um sistema para o controle do sentido de forma simples utilizando apenas chaves, transistores e o circuito de ponte H.

Ponte H

Para realizar o controle dos motores elétricos de corrente contínua é necessário a utilização de uma ponte H, com ela é possível controlar o sentido da corrente que passará pelos terminais do motor, é através dela que é possível ser realizado o controle dos motores, como determinar o sentido que o eixo girará e sua velocidade. O Diagrama da ponte H pode ser visto na figura 7.

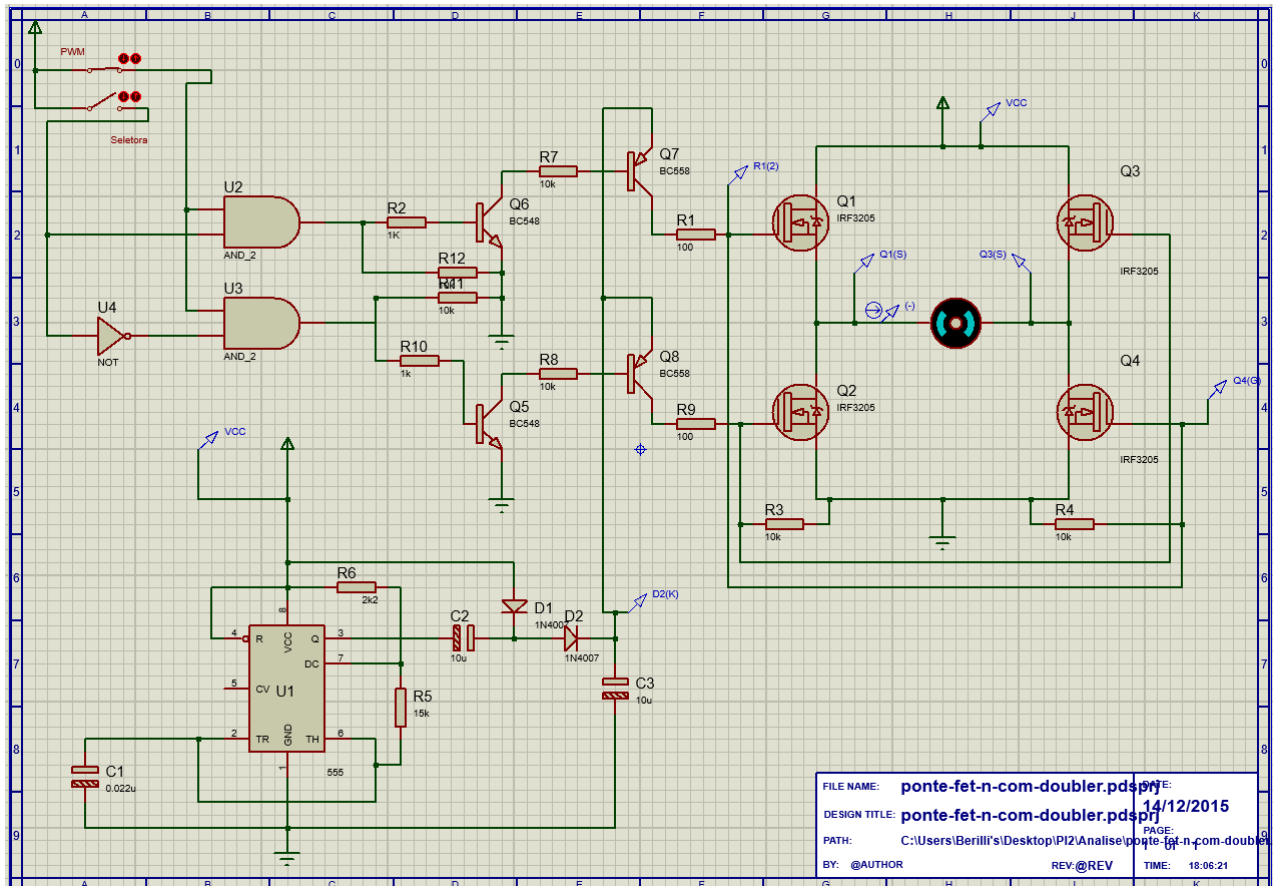


Figura 7 – Ponte H completa e circuitos de acionamento

A ponte H é constituída por um conjunto de quatro transistores, eles são ligados de formas que suas entradas ao serem acionadas polarizem apenas dois transistores dos quatro transistores presentes, como mostrado na figura 8. Permitindo assim, que a corrente flua pelo motor movimentando-o.

Os transistores da ponte H funcionam como chaves controladas por tensão. Serão utilizados os transistores IRF 3205, a polarização de um transistor é dada quando cria-se uma diferença de tensão entre os terminais de *Gate* (G) e *Source* (s), como podem ser vistos na figura 9, quando se cria VGS maior que a tensão de threshold (VTH) o transistor é polarizado corretamente.

A tensão de VTH é a menor diferença de tensão que precisa ser alcançado entre G e S, para que o transistor seja ativado, o valor desta tensão encontra-se no datasheet, para o transistor que será utilizado no projeto tem-se esse valor de 2V a 4V (DATASHEET... ,

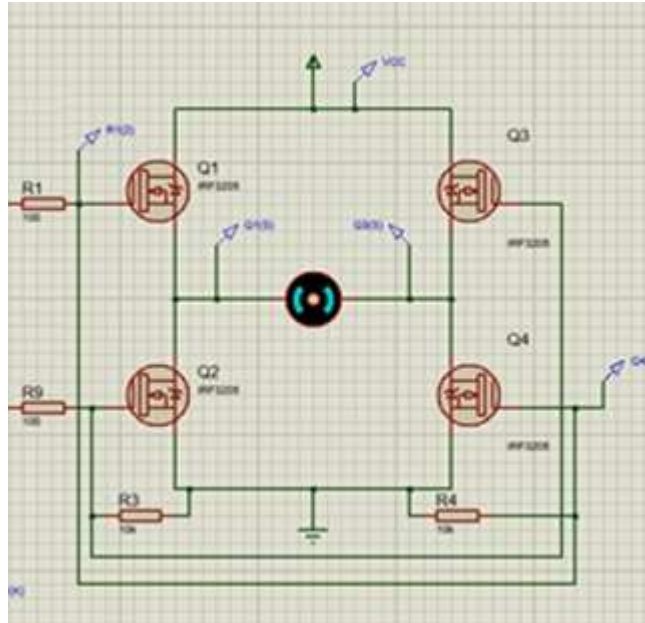


Figura 8 – Ponte H com transistores FETs

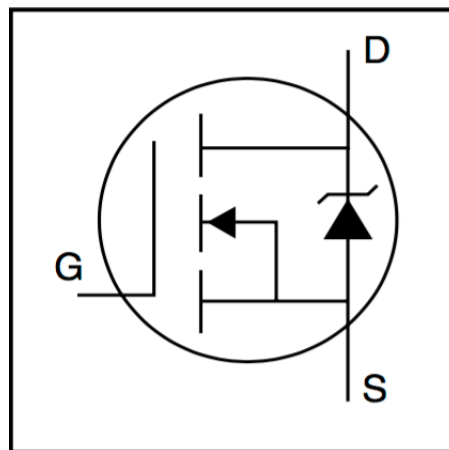


Figura 9 – Portas do transistor IRF 3205 ([DATASHEET...](#), 2001)

2001).

Com isso utiliza-se desta propriedade e da disposição deles para fazer o controle do sentido de giro do motor. Quando o transistor Q1 e Q4 são polarizados, o terminal direito do motor fica com uma tensão mais positiva que o esquerdo, fazendo a corrente fluir da direita para a esquerda como mostrado na figura 10.

Acionando-se em conjunto os transistores Q3 e Q2, o terminal esquerdo do motor fica com uma tensão maior que o direito, fazendo a corrente fluir da esquerda para a direita. Com o acionamento dos transistores Q1 e Q4, como mostrado na figura 11, a corrente flui no sentido contrário e os motores giram no sentido contrário.

Os transistores Q1 e Q2 não podem ser polarizados simultaneamente assim como os transistores Q3 e Q4. Pois o fechamento em conjunto de tais chaves causaria um curto na

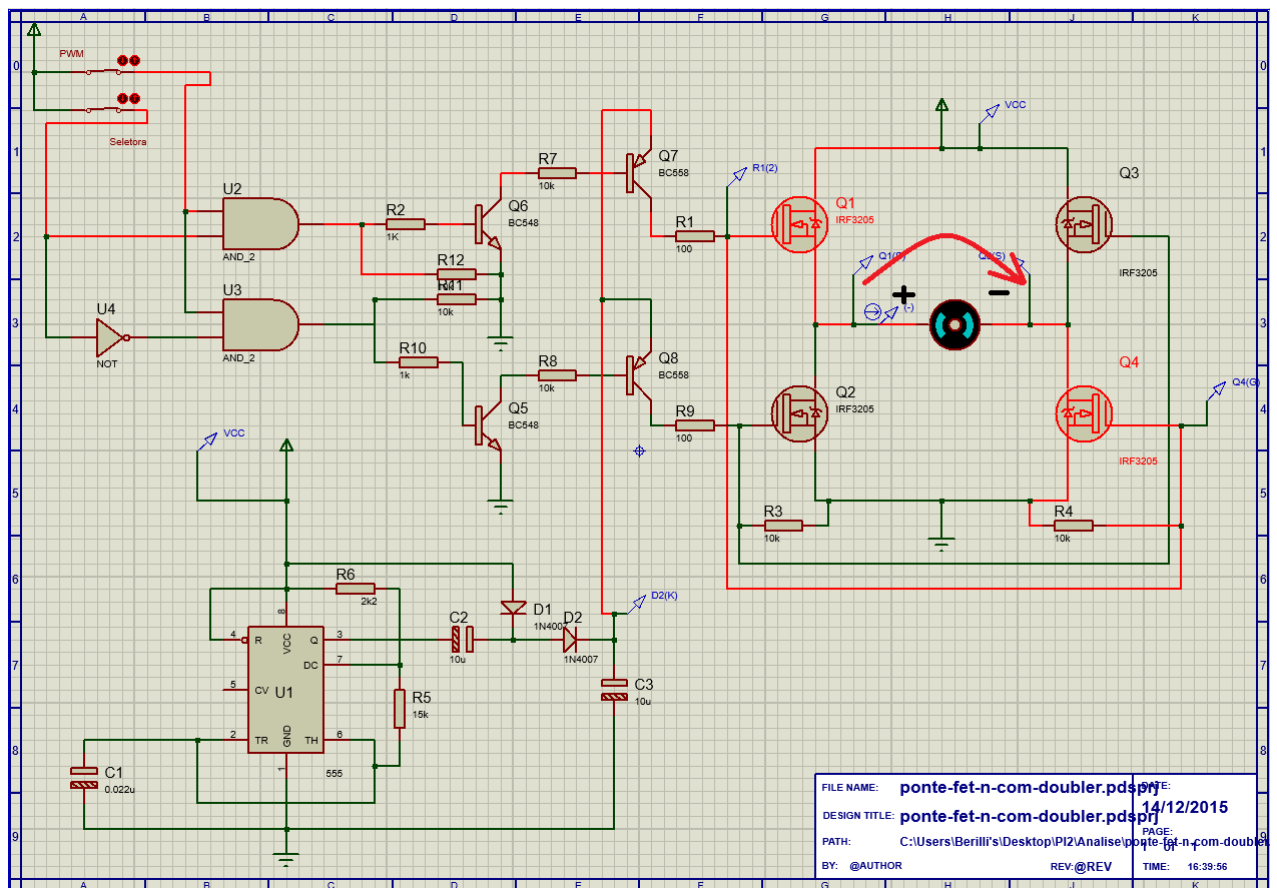


Figura 10 – Motor no sentido horário devido a corrente

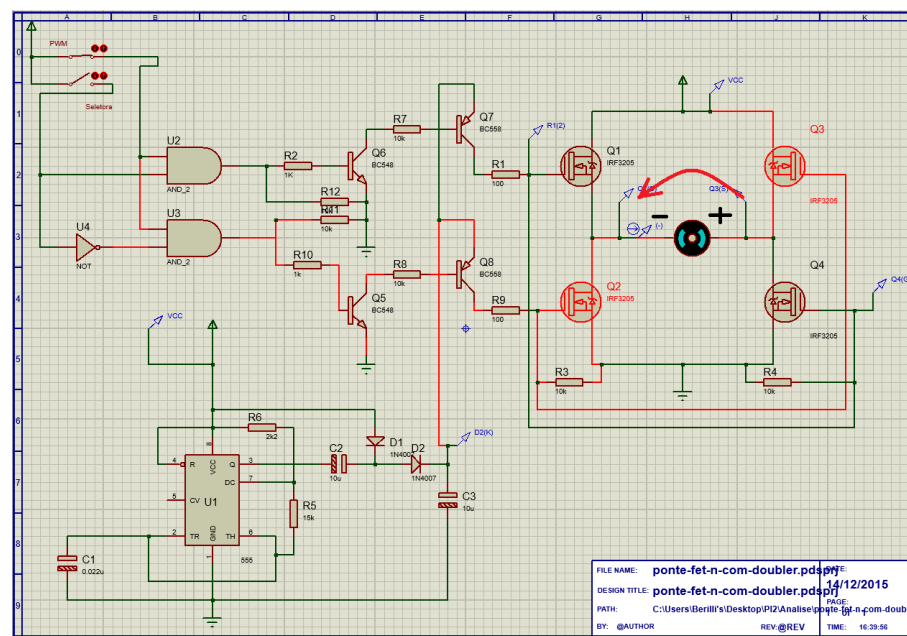


Figura 11 – Motor no sentido anti-horário devido a corrente

fonte de alimentação. Por esse motivo foi desenvolvido um modulo de segurança utilizando portas logicas na entrada, impedindo que as duas entradas que controlam os transistores sejam acionadas ao mesmo tempo.

3 Metodologia

Nesta seção são apresentadas as metodologias de desenvolvimento do produto, de organização e monitoramento e de integração entre engenharias.

A metodologia de desenvolvimento do produto mostra como foram desenvolvidas as partes da estrutura, alimentação e controle do sistema. A metodologia de organização e monitoramento detalha como foram realizadas as reuniões, os papéis de cada membro da equipe, ferramentas de organização e documentos produzidos. Já a parte de integração entre engenharias apresenta a contribuição de cada engenharia no decorrer do projeto.

3.1 Estrutura

A modelagem 3D do dispositivo foi construído um modelo 3D da estrutura, que foi dimensionado de acordo com os dados fornecidos pela NBR 9050 ([ABNT, 2004](#)), de modo que o sistema atenda as cadeiras de rodas que também possuem especificações pela NBR 9050.

Para isso utilizou-se o *software* Catia V5R19, onde uma análise estrutural também foi realizada. Em seguida foi construído um modelo utilizando PVC para os testes iniciais e desenvolvimento dos acoplamentos. Por fim foi feito o protótipo com aço SAE 1020 utilizando técnicas de soldagem no galpão da Faculdade UNB - Campus Gama. Além disso, com o auxílio de um torno mecânico, foi torneado um eixo para o acoplamento do conjunto de motoredutor e roda do sistema.

3.2 Power Train

Para a especificação do conjunto moto-redutor e bateria, foram levantados os requisitos necessários do motoredutor e a autonomia do sistema, comparando os cálculos teóricos realizados e o que é encontrado no mercado.

3.3 Controle

O primeiro aspecto analisado para a parte de controle foi a especificação de tecnologia, que consistiu no estudo e escolha da melhor tecnologia voltada para o problema. Envolvendo desde as especificações do ambiente físico até as especificações do ambiente virtual para desenvolvimento do *software*.

Em seguida simulações foram realizadas com o intuito de saber qual o melhor tipo de controlador de potência a ser usado nos motores. Vários testes foram executados com o intuito de manter o objetivo de implementar aquilo que foi simulado.

Além disso, foi feito um estudo, implementação e testes das soluções encontradas para o *joystick*, gerador de PWM para o controle dos motores e bateria.

3.4 Metodologia de organização e monitoramento

Para a execução do projeto o grupo organizou com base nas metodologias ágeis *Extreme Programming* (XP) e *Scrum*, comuns a engenharia de *software*, porém, estas metodologias foram adaptadas conforme a necessidade e o contexto do projeto que este documento descreve. Um exemplo destas adaptações é a ausência de um *Product Owner*, para esta representação todo o grupo a exercerá através de reuniões para tomadas de decisão.

O *Scrum* e o XP são metodologias ágeis que baseamos para o planejamento do processo produtivo. No início do projeto foi definido o escopo, *product backlog*, de uma forma mais macro, resultando assim na nossa Estrutura Analítica do Projeto (EAP), que pode ser observada na figura 12.

O projeto foi dividido em *Sprints*, técnica do *Scrum* baseada em intervalos fixos de tempo para a entrega de uma parte do produto final *Buils*, que por votação interna teve sua duração limitada a uma semana.

Para cada início de *Sprint* foi realizada o *Planning*, uma reunião dedicada ao planejamento de toda a *Sprint*. Em seu decorrer foram realizadas *Dailies*, que pode ser dito como um *feedback* diário de cada membro, ou cada *pairing*, comunicando o que foi realizado naquele dia, citando as dificuldades e o que será feito no próximo dia. No final da *Sprint* foi realizada uma retrospectiva onde são levantados pontos positivos e pontos a serem melhorados.

Os prazos e datas nos quais foram baseados as datas de entrega, *buils*, releases, foram definidos para se adequar ao tempo da disciplina e às datas estipuladas pelo plano de ensino da disciplina.

Para o acompanhamento do projeto foram utilizadas ferramentas que facilitam os métodos citados anteriormente. Para auxiliar na comunicação foi utilizada a ferramenta *Slack*; para o compartilhamento de Artefatos, pesquisas e documentos foi utilizada a ferramenta *Google Drive*, para reuniões à distancia foi utilizada a ferramenta *Google Hangouts*, para o desenvolvimento e versionamento dos *softwares* foi utilizado o *GitHub*.

Com isso concluiu-se que as fases são divididas em *Sprints*, e as atividades foram definidas no planejamento inicial de cada *Sprint*, bem como os responsáveis. As entradas

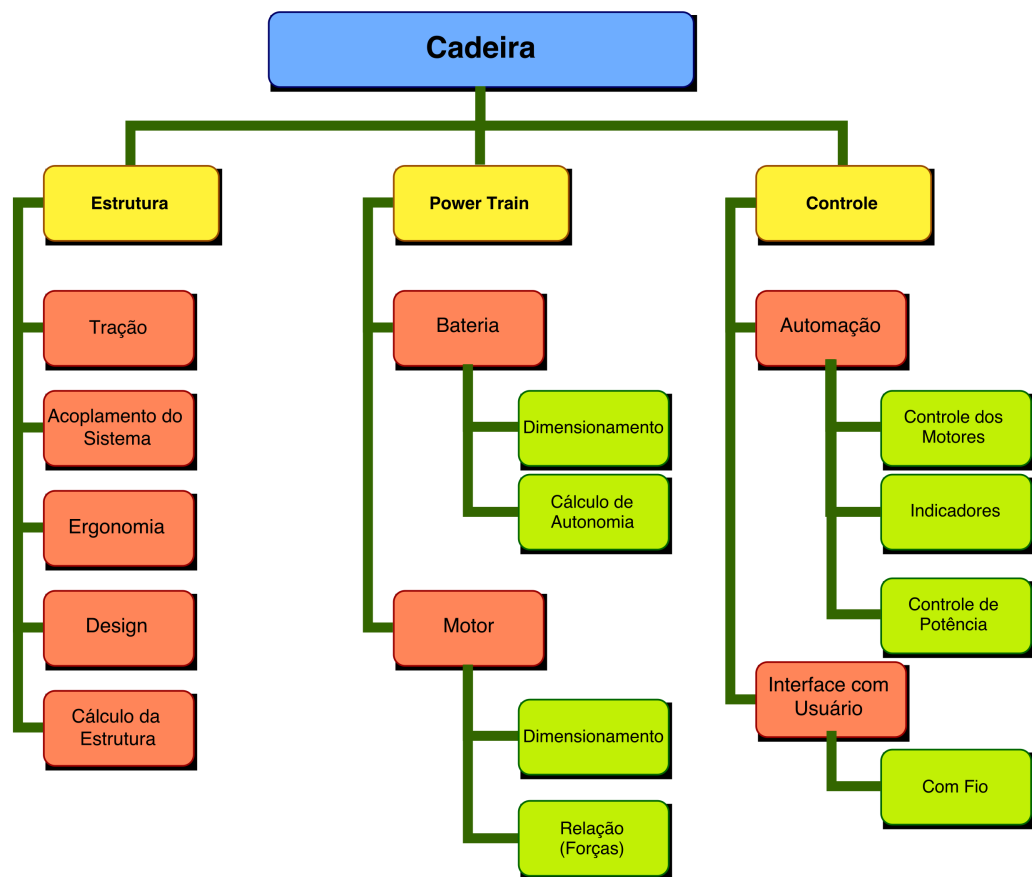


Figura 12 – Estrutura Analítica do Projeto

foram as atividades planejadas, e as saídas foram os relatórios e o produto incrementado.

3.5 Integração entre Engenharias

Considerando a diversidade de conhecimentos das várias engenharias que contribuíram para o trabalho, o grupo teve como objetivo agregar o máximo de informações possíveis, com a finalidade de integração entre os integrantes. Com base nesta integração, então foi alcançado um trabalho final mais completo, envolvendo os membros em atividades que não são apenas a da área de conhecimento. Baseado nessa integração os grupos de pesquisa da primeira Sprint foram separados como mostra na tabela 2. As outras *sprints* podem ser observadas nas imagens no apêndice A.

Com isso em mente e munidos de uma metodologia de organização de ciclo de vida baseados em princípios ágeis, as tarefas são divididas entre pequenos grupos formados pelos integrantes de diferentes engenharias sempre que possível. Como exemplo, temos a tabela 3, que mostra nosso esquemático de divisão das engenharias nos ramos.

| <i>Sprint</i> | Tema | Engenharia |
|---------------|---|---------------------|
| 0 | Manual do usuário das ferramentas a serem utilizadas pelo grupo | Energia/Software |
| | Motor | Eletrônica/Software |
| | Motor | Eletrônica/Energia |
| | Estrutura | Automotiva |
| | Comunicação | Software |
| | Identidade Visual do Grupo | Energia/Software |
| | Projetos Similares | Energia/Software |

Tabela 2 – Exemplo de integração entre engenharias e temas

| | Ramos | Tema |
|---------------|-------------------------|---|
| Segunda parte | Power Train | Especificação do conjunto bateria e alimentação |
| | Estrutura | Acoplamento, design estrutural e sustentação de todo o sistema |
| | Controle | Controle da intensidade e direção dos motores |
| | Interface com o usuário | Recebimento e processamento dos comandos do usuário |
| | Estrutura | Melhorias no acoplamento, design estrutural e sustentação de todo o sistema |
| | Controle | Melhorias no controle da intensidade e direção dos motores |
| | Interface com o usuário | Melhorias no recebimento e processamento dos comandos do usuário |

Tabela 3 – My caption

Embora a intenção principal seja integrar os conhecimentos da melhor forma possível, temos ciência da necessidade de se focar engenharias específicas em determinadas áreas de atuação, fato que pode ser observado na primeira parte da tabela. Porém, após a definição e compra da bateria e motorreductor, realizada no meio do período da disciplina de Projeto Integrador 2, houve a necessidade de finalização desse grupo de atividades e realocação dos integrantes nos outros grupos.

Os integrantes de energia foram divididos em dois grupos, onde um grupo ajudou a estrutura e o outro ajudou o controle. Na parte de estrutura, os alunos de energia ajudaram a construir a estrutura usando soldas e as borboletas para o acoplamento superior do protótipo e a pintá-la.

Já o outro grupo, que ficou responsável em ajudar o controle, aprenderam e ajudaram a soldar as pontes H, fizeram cálculos para o dissipador de calor, e aprenderam a usar Latex. Os integrantes de energia ajudaram também pregando os componentes de estrutura de uma maneira mais organizada e bem distribuídas, e na configuração plug and chug das pontes H.

Os integrantes de estrutura ajudaram os integrantes de controle a colocar os componentes do controle na estrutura de uma maneira em que os fios ficassem dentro da estrutura, sem corromper ou danificar os fios.

Os integrantes do grupo de *software* ficaram responsáveis por desenvolver o sistema que faz a comunicação entre os microcontroladores e motores, modelagem dos estados da cadeira de rodas em relação a intensidade e direção dos motores, em consonância com

o funcionamento do *joystick* e implementação do pulso de PWM. Estas atividade foram auxiliada por parte dos integrantes do grupo da eletrônica, principalmente em relação a como usar os microcontroladores e funcionamento do *software* de maneira embarcada.

Os integrantes de *software* ainda auxiliaram o grupo de eletrônica na confecção dos circuitos da ponte H e depuração dos circuitos da ponte H a procura por erros.

4 Resultados

A partir dos estudos e testes realizados, determinou-se o que foi utilizado no protótipo. Levantou-se um perfil que acreditado ser a mais viável em termos de interação, custo-benefício, tempo, conhecimento técnico e outros fatores importantes para o projeto.

Foi desenvolvido um protótipo de automação acoplável a cadeiras de rodas. Os resultados levantados estão disposto no decorrer do capítulo.

4.1 Estrutura

Com a utilização do programa CATIA V5 3D foi modelado e simulado o protótipo, vide figura 13. Visando três preceitos básicos: comodidade, acessibilidade e conforto.

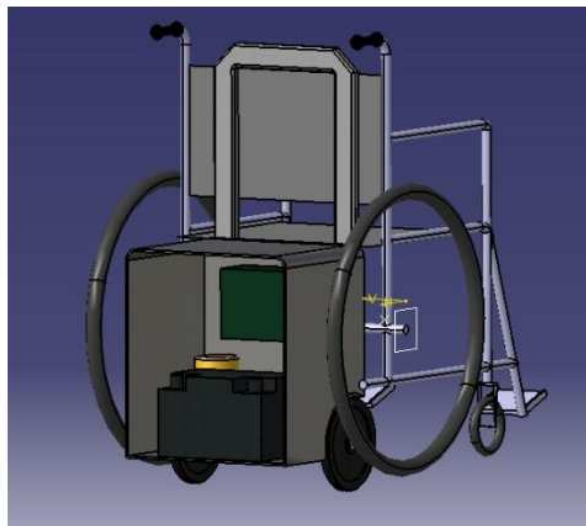


Figura 13 – Vista Isométrica Traseira

A forma como o protótipo se acopla a haste superior da cadeira, usa como base suas hastes verticais e as manoplas da cadeira. Na parte inferior o acoplamento é feito através de braçadeiras que se acoplam as hastes horizontais da cadeira. Tendo em vista que essas hastes são normatizadas pela NBR 9050, tem-se um acoplamento eficaz.

Cada roda foi conectada diretamente ao eixo de um moto redutor, permitindo o controle independente da rotação das rodas. Sendo assim, é possível efetuar manobras que demandam diferentes rotações entre as rodas. Dessa forma, o controle da cadeira será similar a cadeiras automatizadas existentes no mercado, facilitando a interação usuário\cadeira e garantindo controles de direção suficientemente precisos.

Devido ao fato dos eixos das rodas não serem concêntricos quando se realiza um movimento de rotação, ocorre arrasto nas rodas maiores da cadeira de rodas, pois o

movimento gerado faz com que essas rodas girem fora de sua trajetória natural. Isso gera alguns esforços que podem ser prejudiciais a estrutura da cadeira, além de ocasionar desgaste prematuro dos pneus. Para solucionar esse problema as rodas da cadeira e do protótipo deveriam ser concêntricas. O que não é possível de ser alcançado com a estrutura que foi planejada.

4.1.1 Protótipo

A partir do policloreto de vinila (PVC), foi feita uma estrutura de teste para simular o acoplamento a cadeira de rodas, com o intuito de obter um melhor dimensionamento do tamanho da estrutura. O modelo em questão foi feito para ser o mais próximo do modelo idealizado. Este, possui regulagens de altura e largura através de pinos, tubos e braçadeiras para acoplagem satisfatória nas variações dimensionais previstas na norma. A estrutura final de PVC pode ser visualizada na figura 14 abaixo.

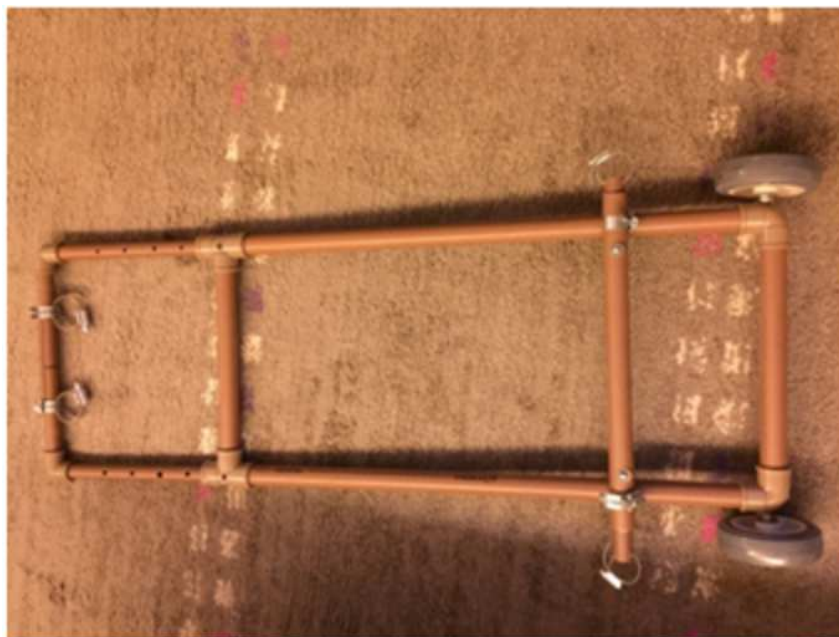


Figura 14 – Estrutura de acoplamento

Em seguida, definiu-se o material a ser utilizado no produto final. A melhor opção encontrada foi o aço SAE 1020, por atender todos os requisitos com consideráveis vantagens quando comparados as alternativas, como por exemplo, ferro ou alumínio.

Alguns elementos foram modificados no sistema de acoplamento inferior e superior, em relação ao que foi idealizado no modelo de PVC para que houvesse maior aderência do mesmo à cadeira de rodas, e evitar esforços mecânicos indesejáveis. Como mostra a figura 15, na parte inferior do protótipo foram adicionados novos furos na vertical, para que a estrutura melhor se acople às cadeiras de rodas de acordo com a NBR 9050.



Figura 15 – Novos furos na parte inferior da estrutura

Além disso, a parte superior da estrutura, recebeu um novo método de acoplamento, que foi feito através da utilização de tubos de aço. Em que a parte inferior de um dos tubos foi soldado transversalmente com a parte superior do outro tubo. Dois parafusos do tipo borboleta foram adicionados na parte central destes tubos para facilitar seu aperto. Este sistema está ilustrado na figura 16.



Figura 16 – Novo acoplamento superior

Neste novo mecanismo de acoplamento, a parte superior da estrutura pode variar horizontalmente de forma mais simples. Uma vez que os tubos inferiores movem-se horizontalmente nos braços da estrutura, permitindo um amplo acoplamento em diferentes tipos de cadeiras de rodas.

A figura 17a apresenta a parte frontal da estrutura, que será acoplada na parte posterior da cadeira de rodas. É possível observar os novos furos que foram feitos na parte inferior, permitindo que o acoplamento inferior se mova em mais posições na vertical. Isto faz com que a estrutura se adeque a NBR 9050. Na figura 17b é possível observar a estrutura acoplada a cadeira.

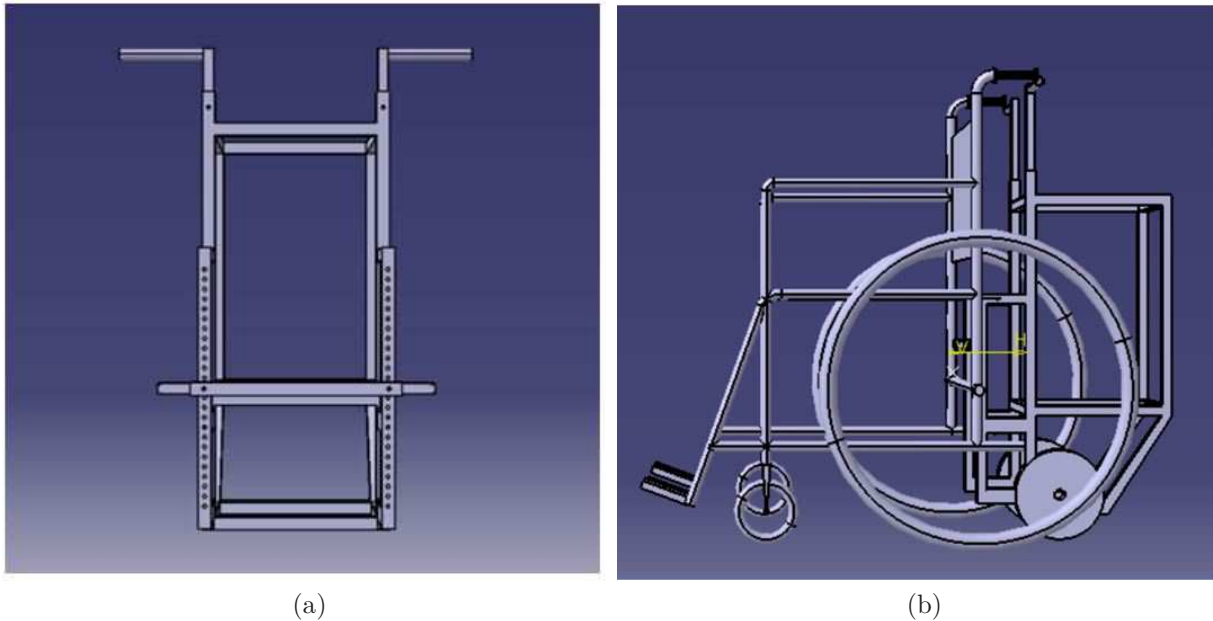


Figura 17 – Em (a) Vista frontal da estrutura do Sistemad; Em (b) Esquemático de estruturas acopladas

4.1.2 Esforços Estruturais

A partir da modelagem tridimensional da estrutura, podem ser demonstradas as tensões segundo o critério de Von Mises, que nos permite ver a tensão de cisalhamento máxima ou a energia de distorção máxima suportada pela estrutura.

A figura 18 representa as deformações na estrutura devido aos carregamentos estáticos no sistema e as devidas restrições relativas ao acoplamento e ao contato das rodas com o chão. Os carregamentos adotados foram de 14 kg da batedeira, 15 kg dos dois motores e estimados 2 kg de todo o sistema de controle que foram posicionados em suas posições de trabalho. Vale ressaltar que as deformações apresentadas possuem um fator de aumento de 1000 para possibilitar a visualização.

As tensões encontradas no sistema obedeceram o critério de Von Misses, onde é possível notar que a parte inferior da base é o gargalo, pois ela sofre as maiores tensões da estrutura. Na figura (a) verifica-se que a tensão máxima do material é 0.372 MPa, enquanto a figura (b) apresenta a visão frontal destas tensões. Com esses valores, sabemos que a estrutura resistirá aos carregamentos a ela submetidos, já que a tensão de escoamento do aço 1020 é de 210 Mpa.

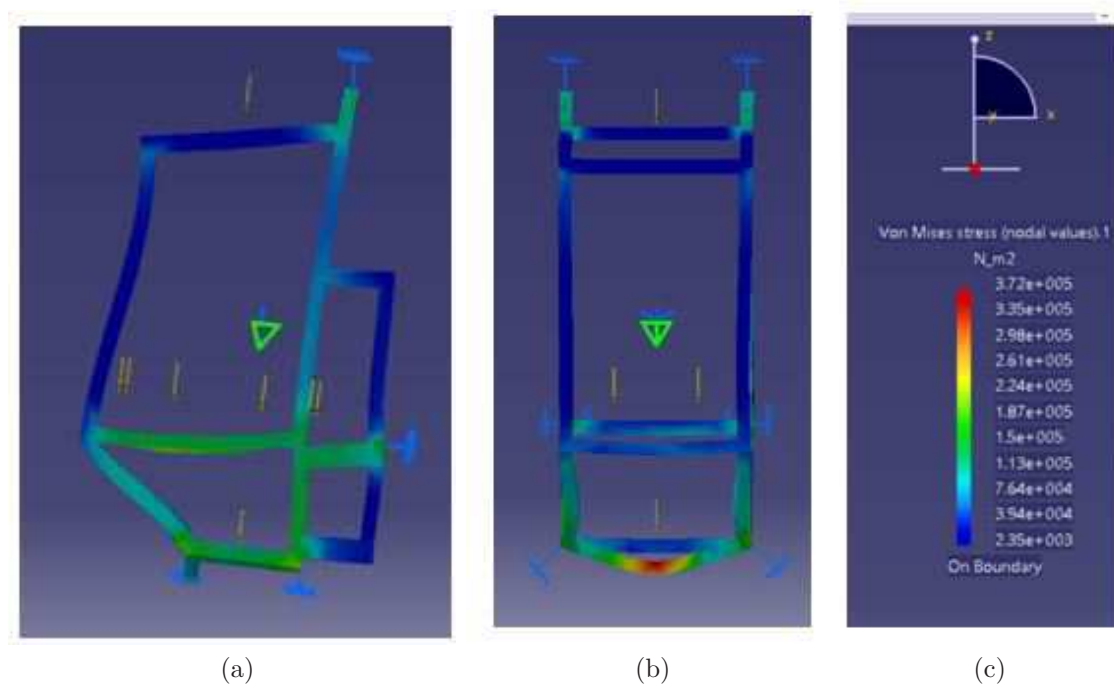


Figura 18 – Tensão de Von Mises máxima e mínima do material

4.1.3 Centro de Massa

O cálculo do centro de massa do conjunto total (cadeira, cadeirante e sistema de automação) foi necessário para o cálculo da potência requerida dos motores. O centro de massa foi estimado a partir da soma vetorial dos centros de massa parciais do conjunto cadeira-cadeirante que foi obtido a partir dos estudos de (KAMPER et al., 2000), vide figura 19.

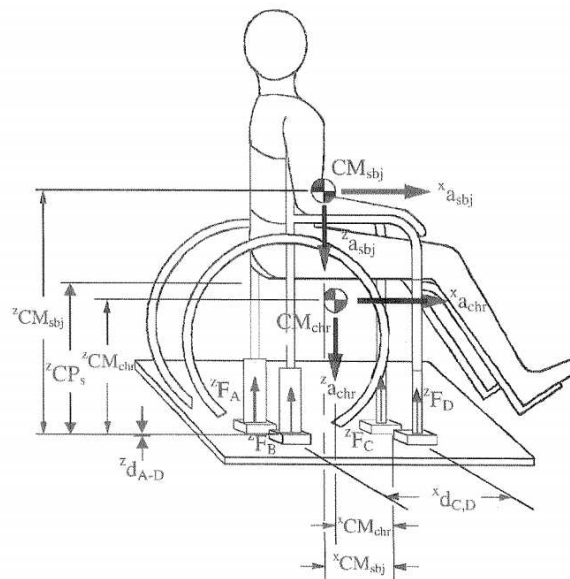


Figura 19 – Esquemático posicionamento do centro de massa sistema cadeira e cadeirante.
Fonte: (KAMPER et al., 2000)

O centro de massa do sistema de automação, vide figura 20, foi obtido a partir de uma simulação estática da estrutura em que se aplicou os devidos carregamentos e restrições de trabalho.

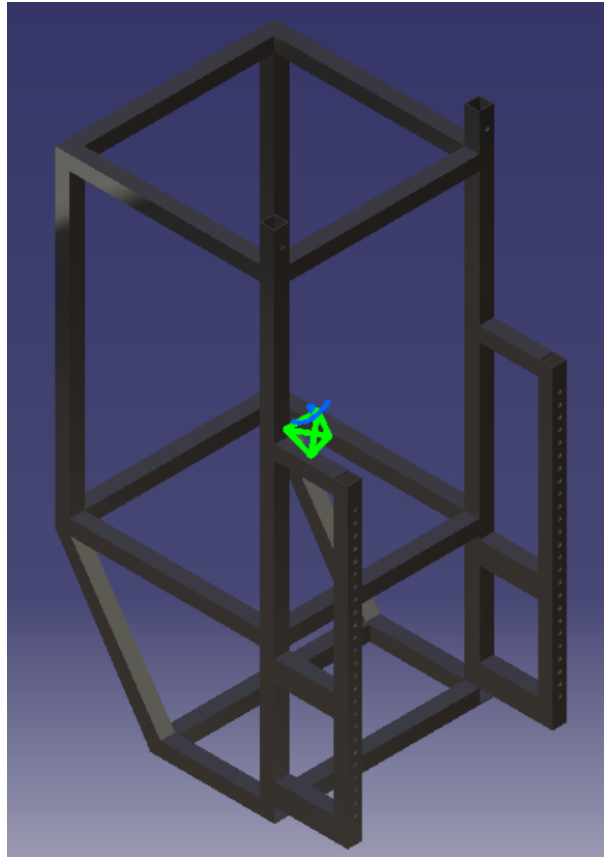


Figura 20 – Representação do centro de massa do sistema de automação

As coordenadas encontradas, tanto na literatura quanto computacionalmente, foram manualmente modificadas de modo a ter o eixo da roda maior da cadeira de rodas como ponto de origem para o cálculo vetorial. Vale lembrar que os cálculos desconsideram possíveis deformidades no corpo do usuário que possam causar assimetria na distribuição de massa.

Desta maneira, os cálculos resultaram que o centro de massa está, portanto, a 45 cm do eixo das rodas maiores da cadeira verticalmente para cima, e a 5 cm deste eixo horizontalmente na direção do usuário. Foi observado que o centro de massa foi deslocado para mais perto do eixo das rodas maiores por causa de sua carga adicional ao sistema.

4.2 Power-Train

4.2.1 Resistência a Rolagem

Ao acoplar o protótipo criado para automatizar a cadeira de rodas, acrescenta-se um peso a mais ao sistema, assim como um ponto a mais de contato de distribuição

da massa total é adicionado ao sistema. Desta maneira, as forças nas rodas traseiras são aliviadas por serem divididas com as rodas do protótipo. A figura 21 apresenta as distâncias entre os eixos das rodas da cadeira e do protótipo ao centro de massa.

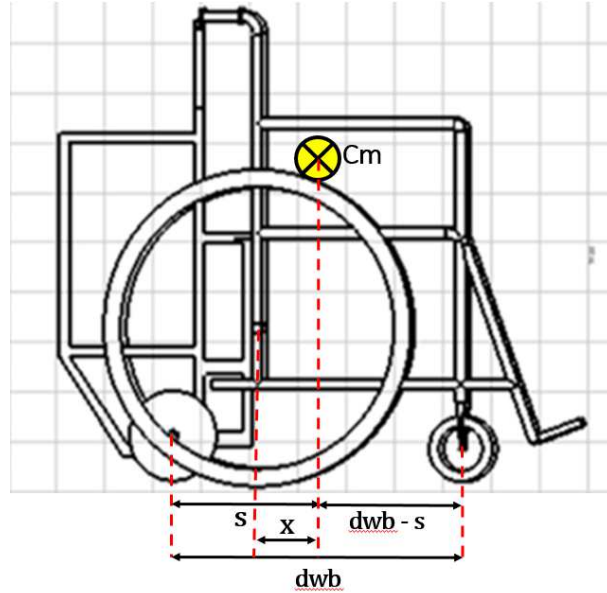


Figura 21 – Diagrama das Variáveis para determinação da Resistência de Rolagem com o protótipo acoplado. Autoria própria.

Desta maneira, as equações discutidas anteriormente são modificadas para se ajustarem ao protótipo acoplado, onde s é a distância entre as rodas do protótipo e o centro de massa, e dwb é a distância entre o eixo das rodas dianteiras e as rodas do protótipo. Como explicado na seção anterior, a distância entre o eixo das rodas maiores e o centro de massa, neste caso x , foi igual a 5 cm.

$$f_p = m * g \frac{(dwb - s - x)}{dwb}; f_{p,rr} = \mu * f_p \quad (4.1)$$

$$f_r = m * g \frac{(dwb - s)}{dwb}; f_{r,rr} = \mu * f_r \quad (4.2)$$

$$f_c = m * g \frac{x}{dwb}; f_{c,rr} = \mu * f_c \quad (4.3)$$

$$f_{rr} = f_{c,rr} + f_{r,rr} + f_{p,rr} \quad (4.4)$$

A distribuição do peso na cadeira de rodas é, portanto, de 44.4 % para a roda do sistema, 51.4 % para as rodas traseiras da cadeira e 4.2 % para as rodas dianteiras da cadeira. As constantes usadas nestes cálculos foram:

As constantes usadas nestes cálculos foram:

- $\mu = 0.03$. Coeficiente estimado para o pior piso e pior tipo de material da roda (WOUDE C. GEURTS, 2003);

- $m = 150$ kg (massa máxima);
- $g = 9.81$ m/s²;
- $dwb = 72$ cm;
- $s = 35$ cm;
- $x = 5$ cm;

Os resultados das forças de resistência ao rolamento são, portanto:

- $f_{p,rr} = 19.62$ N;
- $f_{r,rr} = 22.686$ N;
- $f_{c,rr} = 1.839$ N;
- $f_{rr} = 44.145$ N;

Esta força deve ser vencida pelos motores acoplados ao protótipo de modo a retirar a cadeira da inércia quando todas as rodas da cadeira estão alinhadas para frente perfeitamente. Porém, isto nem sempre acontece.

Portanto foi feita uma simulação para quando as rodas dianteiras estão paralelas às rodas traseiras. Nesta configuração, as rodas dianteiras fornecem uma resistência a mais ao movimento. Esta resistência foi considerada como uma resistência de atrito estático e depende do coeficiente de atrito estático do material das rodas dianteiras (μ_e) e da fração da massa suportada nas rodas dianteiras que pode ser definida como:

$$c = \frac{x}{dwb} \quad (4.5)$$

A resistência adicional pode ser definida, portanto, como:

$$f_{ce} = m * g * \mu_e \frac{x}{dwb} \quad (4.6)$$

A resistência total ao movimento (f_T) seria portanto a soma das resistências de rolamento com a de atrito estático:

$$f_T = f_{rr} + f_{ce} = 44.146 + 45.984 = 90.129N \quad (4.7)$$

Isto exige um torque inicial de 9.0129 Nm (dado que os raios das rodas do protótipo são de 10 cm). Portanto, pode-se dizer que, nesta situação, a potência necessária para retirar a cadeira da inércia é de:

$$P = T * \omega = 9.0129 * 26.18 = 235.96W \quad (4.8)$$

A potência entregue pelos motores à cadeira de rodas é maior que estes 235.96 W. A diferença entre a potência entregue e a necessária para retirar a cadeira da inércia é considerável, o que poderia causar um arranque repentino do sistema. Este tranco poderia prejudicar o usuário assim como a cadeira. A solução para este problema está no uso de pontes H, que fornecem corrente aos motores de forma gradativa a medida que o usuário empurra o joystick, diminuindo o arranque do protótipo.

4.2.2 Motoredutor

Foi utilizado no projeto o motor de corrente contínua. A escolha foi feita pois esse tipo de motor é muito utilizado em projetos que necessitam de velocidades variáveis, eles também apresentam uma região de torque e potência constante ([HAMANAKA; DIAS, 2002](#)).

Após uma vasta pesquisa no mercado de motores e redutores, optou-se por comprar dois motoredutores feitos pela empresa MKS Redutores de São Paulo. O motor com redutor escolhido para o projeto foi o MR com motor GPB que possui as seguintes especificações:

- Potência de 305 a 350 W;
- 12 ou 24 Vcc;
- Rotação de entrada de 2500 rpm;
- Reduções de 1:10 até 1:60.

Especificações a serem atendidas:

- Velocidade máxima de 10 km/h;
- 12 Volts corrente contínua;
- Peso da bateria 15 kg;
- Peso da cadeira (valor aproximado) 15kg;
- Peso total estimado: 150 Kg;
- Redução de pelo menos 1:10.

4.2.3 Bateria

A bateria de chumbo-ácido é muito utilizada hoje em dia em diferentes áreas, como automóveis, sistemas de fornecimento de energia elétrica ininterrupta (*no-breaks*) e cadeiras de rodas elétricas. Desprezando-se o problema do peso e considerando as observações feitas anteriormente no capítulo 2, a bateria de chumbo-ácido selada foi a escolhida para o projeto, considerando ainda o seu fácil acesso no mercado e baixo custo.

4.2.3.1 Autonomia

Segundo a literatura, cadeiras de rodas elétricas trabalham com motores de corrente contínua entre 250 W a 300 W de potência. Há diversas maneiras de chegar neste valor, como por distribuição de forças, por balanço de energia, por forças em um plano inclinado, entre outras. Para este projeto fez-se uma estimativa da potência necessária através do balanço de energia (YAMAGUTI, 2010).

A energia fornecida pelo motor deve ser igual à energia cinética da cadeira. Sendo a massa máxima que a cadeira de rodas aguenta de 150 kg e considerando que cadeiras de rodas elétricas chegam até 10 km/h, tem-se:

$$Em = \frac{m * V^2}{2} \quad (4.9)$$

Em que Em é a energia fornecida pelo motor, m é a massa do sistema e V é a velocidade máxima. Assim, a energia necessária para mover a cadeira é de $578.7J$. Este valor pode ser relacionado com a potência do sistema por esta ser igual a taxa de energia, ou seja, 1 watt é igual à 1 joule por segundo. Assim, a cadeira de rodas terá a capacidade de realizar $578.7J$ a cada segundo de trabalho, com isso a potência exigida dos motores será de $578.7W$.

Após uma pesquisa no mercado, foram adquiridos dois motores de corrente contínua de 12 volts e 305 watts para o projeto, assim, a potência total entregue ao sistema é de $610W$. Este tipo de motor possui perdas de potência tanto mecânicas (Pm) quanto térmicas (Pj) (MEC060, 2015). A primeira está associada a perdas por causa da velocidade: por atrito, nas escovas do motor e por curto-circuito; estima-se que estas juntas sejam cerca de 3 a 5% da potência nominal do motor.

As perdas térmicas estão associadas ao efeito Joule: os fios usados nos enrolamentos dos motores apresentam certa resistência elétrica. A corrente entregue para o motor, em máxima potência é dada pela divisão da potência pela tensão do motor: $I = 25.417 A$. Desta forma, a resistência R pode ser calculada pela fórmula da potência a seguir:

$$P = R * I, \text{ assim, } R = \frac{305}{25.417^2} = 0.47231\Omega \quad (4.10)$$

As perdas nos enrolamentos (P_j) é portanto:

$$P_j = R * I = 0.47213 * 25.417 = 12W \quad (4.11)$$

As perdas totais (P_t) são, portanto:

$$P_t = P_j + P_m = 12 + (305 * 0.05) = 27.25W \quad (4.12)$$

Estas perdas representam cerca de 9% da potência nominal do motor. Desta maneira, pode-se considerar a equação real da energia abaixo (Emr), onde são consideradas as perdas através do termo ϵ , que é igual a 1.09.

$$Em = \frac{m * V^2 * \epsilon}{2} \quad (4.13)$$

Assim, a potência necessária para mover a estrutura seria, teoricamente de 630.4W. Para encontrar o valor da velocidade final do sistema, foram considerados os dois motores de 305W, o peso m de 150Kg e o termo ϵ . Além destes, uma eficiência de 80% foi atribuída ao acoplamento das rodas com o eixo do motor. Estes 20% englobam as perdas no redutor, perdas por escorregamento da conexão do redutor e da roda com o chão, entre outros. Assim, temos:

$$Em = 0.8 * \sqrt{\frac{600 * 2}{m * \epsilon}} \quad (4.14)$$

Assim, a estimativa da velocidade máxima da cadeira é de aproximadamente 8.6 km/h, que é uma velocidade bem razoável para este tipo de sistema. Sabe-se que a velocidade angular é dada pela divisão da velocidade linear pelo raio:

$$\omega = \frac{V}{r} \quad (4.15)$$

Logo, utilizando a velocidade estimada acima, a velocidade angular obtida é de 23.9 rad/s ou 228.31 rpm. Considerando as especificações do motor, sua velocidade angular nominal de 2500 rpm, teria de ser feita uma redução de pelo menos 1:11, onde a velocidade angular de saída do redutor seria de 227.3 rpm.

Por motivos construtivos do motoredutor, a redução só pode ser feita de 1:10 ou de 1:15. Desta forma optou-se por uma redução de 1:10, que proporciona velocidade de saída nominal de 250 rpm (26.18 rad/s) no redutor. Sendo o torque a divisão da potência pela velocidade angular, o torque gerado é de 23.30 Nm.

Para atender dois motores de 305 W, é conectada uma bateria de carro de chumbo-ácido selado de 12 V (U) e capacidade de 60Ah ($I * \Delta t$), tem-se que a energia E gerada pela bateria é de:

$$E = (I * \Delta t) * U = (60Ah) * 12 = 720Wh \quad (4.16)$$

Desta forma, considerando a potência consumida pelos dispositivos eletrônicos de controle desprezível, tem-se que a autonomia da bateria seria de pouco mais de uma hora:

$$\Delta t = \frac{720Wh}{610W} = 1.18h = 1hora e 10 minutos \quad (4.17)$$

4.3 Controle

O controle da cadeira de rodas foi feito em dois principais componentes: Joystick e Controlador dos Motores, além de um componente opcional, o Controlador Central.

O módulo Joystick tem o propósito de receber os comandos provenientes do usuário e enviá-los para o próximo módulo. O módulo opcional, Controlador Central, recebe as informações do Joystick e as envia para o Controlador dos Motores. Este, por sua vez, recebe as informações referentes à velocidade e direção de cada motor e as utiliza para produzir dois pulsos de PWM que controlam os motores através de duas pontes H.

4.3.1 Panorama atual

Na atual versão do sistema, o usuário pode mover a cadeira de rodas através de um joystick, ligar e desligar o sistema através de uma chave e acompanhar o seu estado (ligado ou desligado) através de um LED, ambos acoplados ao joystick. Os dados referentes ao movimento do joystick são então enviados diretamente para o Controlador dos Motores, o qual controla o movimento (velocidade e direção) dos motores de acordo com os dados recebidos.

Ainda foi implementado o módulo Controlador Central que, atualmente, apenas repassa as informações recebidas pelo Joystick para o Controlador dos Motores, cabe ressaltar que este módulo não foi integrado à versão atual do sistema devido ao seu atraso na inicialização do sistema e a não inclusão de novas funcionalidades.

4.3.2 Joystick

O módulo Joystick é a interface de ligação entre o usuário e a cadeira de rodas, este componente é composto por um *joystick* (alavanca que se move sobre uma base e capta

movimentos em dois eixos), uma chave liga/desliga do sistema de controle, juntamente com um LED e um microcontrolador.

Para permitir o controle do sistema pelo usuário, foi montado uma caixa plástica com o Joystick e uma placa de controle. Com o controlador travado, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso, utilizada tanto no controlador quanto no MSP de controle da mesma. A primeira ponta, controlador, possui LEDs e a segunda, pinos de saída para o MSP. Essas placas possuem RJ-45 fêmea e as saídas para o joystick e LEDs. O sistema utiliza esse tipo de conector pois facilita a conexão ponta a ponta, possui várias vias de transmissão de dados e pode ser facilmente substituído. Por fim, a placa de controle e o joystick foram travados com parafusos em uma placa de madeira para dar peso e robustez e a caixa plástica cortada de acordo com o Joystick e conectores. Estas configurações podem ser vistas na figura 22.



Figura 22 – Imagem do controle da cadeira de rodas

O *joystick* utilizado é composto por dois potenciômetros que indicam as posições em dois eixos independentes. Utilizando os potenciômetros como simples divisores de tensão é possível inferir as posições de seus eixos a partir da medições das tensões do circuito, para realizar esta medição e então rastrear o comando de movimento do usuário, são utilizados dois canais de conversores AD, uma para cada potenciômetro, tais conversores são internos ao microcontrolador utilizado e não necessitam de nenhum *hardware* extra.

A rotina de trabalho do microcontrolador do módulo Joystick consiste em adquirir os valores analógicos das posições do *joystick*, convertê-los em valores digitais de um *byte*

cada, diferenciando-os utilizando a estratégia de representar um eixo apenas por valores ímpares e o outro apenas por valores pares (ambos entre 0 e 255) e enviá-los via serial alternadamente em um laço infinito, conforme a figura 23.

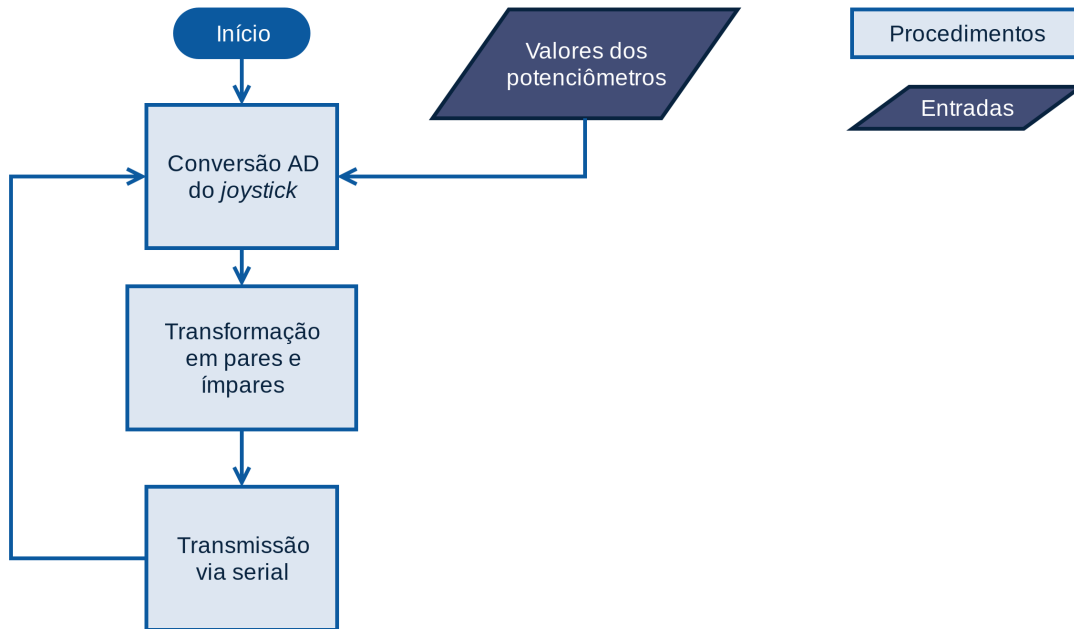


Figura 23 – Rotina de trabalho do microcontrolador do módulo Joystick

4.3.3 Controlador Central

O Raspberry foi utilizado como central de comandos para processar as informações vindas do MSP dedicado ao módulo Joystick e enviar o resultado deste processamento para o MSP dedicado aos Motores.

Comunicação entre MSP e Raspberry

A comunicação, tanto entre o MSP do Joystick e o *Raspberry PI*, quanto entre o MSP do Motor e o *Raspberry PI*, foram feitas via *threads*.

A conexão entre os MSP foi formulada através do método *findPort*. Sua implementação pode ser observada na figura 24.

Este método permite que tanto o MSP do Joystick quanto o MSP do Motor sejam conectados sem a previa identificação de qual porta utilizar para comunicação. Porém, há existência de prioridade entre as *threads*, ou seja, enquanto a *thread* do Joystick não se conectar com sucesso a *thread* do Motor não irá realizar a conexão.

Para que este processo ocorra com sucesso, uma checagem de dados é feita para cada tentativa de conexão. Esta checagem consiste em verificar se a porta a ser conectada está enviando ou recebendo dados. Para que a conexão do Joystick ocorra com sucesso, a porta deve estar recebendo dados, para que a conexão do Motor ocorra com sucesso, a

```
def findPort(self,port):
    global serialMotor
    while port < 2:
        try:
            serialMotor = SerialObject.initSerialObject("/dev/ttyACM" + str(port), True)
            port += 1
            return True,port
        except serial.SerialException:
            print("SerialException: device " + str(port) + " could not be found or could not be configured.")
            port += 1
            continue
    return False,port
```

Figura 24 – Método para encontrar porta dinamicamente

porta não deve receber dados. A implementação desta checagem pode ser verificada na figura 25.

```
def tryReceiveData(self):
    rcv_str = serialMotor.read(10)
    if(len(rcv_str) == 0):
        return False
    else:
        logging.info("Motor: I don't want you, joy!")
    return True
```

Figura 25 – Método para checar se existe recebimento de dados em porta. Caso do Motor.

Esta estratégia auxilia na manutenção do produto, pois caso algum MSP fique inutilizável, é possível colocar outro MSP, previamente configurado, no lugar do componente inutilizado.

Após o Raspberry conseguir encontrar uma porta para se conectar com o MSP do Joystick, então a *thread* do MSP do Motor utiliza do mesmo método para se conectar.

Ao se ter as duas conexões estabelecidas, então os dados são adquiridos do Joystick e enviados para os Motores. Para se realizar este envio de informações de forma correta é necessário fazer a sincronização entre as *threads*.

Sincronização de *Threads*

Foi percebido que as *threads* precisam estar sincronizadas para se fazer o envio de informações de forma correta. Pois a *thread* do Joystick recebe as informações, e a *thread* do Motor consome estas informações.

Este problema de sincronização das *threads* é conhecido como o clássico problema da programação paralela: Produtor e Consumidor.

Este problema é caracterizado por 2 processo que compartilhem de um *buffer* comum, no qual o produtor insere a informação no *buffer* e o consumidor retira a informação do *buffer*. Possíveis problemas: Produtor insere produto onde não foi consumido

e consumidor remove informação onde já foi removido. Mais detalhes do problema no capítulo 2.

Este problema foi solucionado com os seguintes passos:

1. Produtor: Produz os itens necessários em *buffer*, no caso os valores referentes aos potenciômetros do Joystick. Neste momento a *thread* do Consumidor é parada e uma variável responsável por esta trava é notificada. Isto pode ser visto na figura 26;
2. Consumidor: Consume os itens em *buffer* enviando os mesmos para o MSP dos Motores. Neste momento a *thread* do Produtor é parada e a variável responsável pela trava é consumida. Isto pode ser visto na figura 27;

A variável de trava é utilizada com o propósito de se fazer a produção e o consumo de forma sincronizada e nunca ao mesmo tempo. O processo do Consumidor somente será ativo quando o processo do Produtor setar a variável de trava.

```
globs.lock.acquire()
if c[0] & 1:
    globs.coordinates['x'] = c[1] & 0xFE
    globs.coordinates['y'] = c[0] | 0x01
else:
    globs.coordinates['x'] = c[0] & 0xFE
    globs.coordinates['y'] = c[1] | 0x01

globs.lock.notify()
globs.lock.release()
```

Figura 26 – Código utilizado para notificar variável de trava

```
globs.lock.acquire()
if self.x != globs.coordinates['x'] or self.y != globs.coordinates['y']:
    print(str(globs.coordinates['x']) + ',' + str(globs.coordinates['y']))
    self.x = globs.coordinates['x']
    self.y = globs.coordinates['y']
    serialMotor.flushOutput()
    success = SerialObject.writeWithSerial(serialMotor, [self.x, self.y])
else:
    #print("Else writing information")
    globs.lock.wait()
    logging.info("Motor: X and Y not change.")
    #break
globs.lock.release()
```

Figura 27 – Código utilizado para consumir itens e consequentemente a variável de trava

4.3.4 Motor

O módulo Motor é utilizado para fazer a movimentação da cadeira, conforme os comandos enviados pelo usuário através do módulo Joystick. O módulo Motor é composto por 2 motores de corrente contínua e um microcontrolador.

O microcontrolador deste módulo tem como intuito receber as informações do controlador central e gerar 2 pulsos de PWM, um para cada motor. As funções *update_left* e *update_right*, vide figura 28, tem como objetivo atualizar o *duty cycle* para cada motor.

```
void update_right(unsigned char value) {
    if(value > 126) {
        P2OUT |= SEL2;
        TA1CCR2 = (CYCLE * (2*(long long)value - 255)) / 252;
    }
    else {
        P2OUT &= ~SEL2;
        TA1CCR2 = (CYCLE * (253 - 2*(long long)value)) / 252;
    }
}

void update_left(unsigned char value) {
    if(value > 127) {
        P2OUT |= SEL1;
        TA1CCR1 = (CYCLE * (2*(long long)value - 257)) / 252;
    }
    else {
        P2OUT &= ~SEL1;
        TA1CCR1 = (CYCLE * (255 - 2*(long long)value)) / 252;
    }
}
```

Figura 28 – Funções para atualização de taxa do *duty cycle*

Os valores são recebidos através da função *update*, vide figura 29, responsável por receber de forma correta os dados. Esta rotina consiste em verificar se o valor recebido é ímpar ou par. Isto é feito por causa da estratégia utilizada para diferenciar os dados de cada potenciômetro enviados do módulo Joystick, através do controlador central.

```
void update() {
    if(rxbuf[0] & 1) {
        update_right(rxbuf[1]);
        update_left(rxbuf[0]);
    }
    else {
        update_right(rxbuf[0]);
        update_left(rxbuf[1]);
    }
    rxbuf[0] = rxbuf[1] = 0;
}
```

Figura 29 – Função para diferenciação de dado recebido

A função *update_left* recebe os valores pares, e a função *update_right* recebe os valores ímpares.

4.3.5 Integração Motor e Joystick

Para se fazer a movimentação da cadeira de forma correta, foi feito um mapeamento dos possíveis estados de movimentação. Estes estados foram inicialmente mapeados utilizando os valores do módulo do Joystick. Com base nos estados mapeados, a intensidade e direção dos motores são formulados. Esta integração foi implementada na *Raspberry*.

Mapeamento dos Estados em Relação ao Joystick

Estes estados, vide tabela 4, são formalizados a partir das possibilidades de valores que podem ser capturados do módulo Joystick.

Os valores do potenciômetro 1 são referenciados para o motor da esquerda e os valores do potenciômetro 2 são referenciados para o motor da direita.

| ID | Valor Potenciômetro 1 | Valor Potenciômetro 2 | Estado |
|----|-----------------------|-----------------------|---|
| 1 | 254 | 255 | Para frente |
| 2 | 254 | 1 | Virar para direita (próprio eixo) |
| 3 | 254 | 127 | Virar para direita (eixo motor 2) frontal |
| 4 | 126 | 127 | Parado |
| 5 | 126 | 255 | virar para esquerda (eixo motor 1) frontal |
| 6 | 126 | 1 | virar para esquerda (eixo motor 1) traseiro |
| 7 | 0 | 1 | Para trás |
| 8 | 0 | 255 | Virar para esquerda (próprio eixo) |
| 9 | 0 | 127 | virar para direita (eixo motor 2) traseiro |

Tabela 4 – Mapeamento dos estados conforme valores do Joystick

Para elucidar os estados da tabela 4 a figura 30 foi confeccionada.

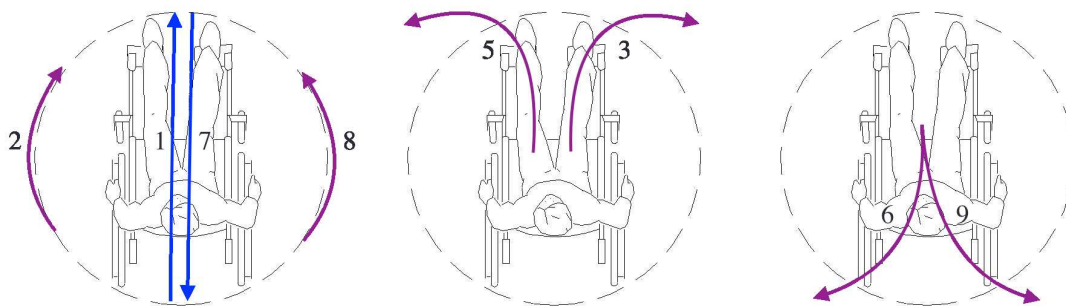


Figura 30 – Estados da cadeira

Mapeamento de Intensidade e Direção dos Motores

Conforme os estados mapeados na tabela 4, as intensidades e direções de cada motor são definidas na tabela 5.

| ID | Estado | Motor 1(Intensidade(%), Direção) | Motor 2(Intensidade (%), Direção) |
|----|---|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Para frente | (100, +) | (100, +) |
| 2 | Virar para direita (próprio eixo) | (100, +) | (100, -) |
| 3 | Virar para direita (eixo motor 2) frontal | (100, +) | (0 , *) |
| 4 | Parado | (0, *) | (0, *) |
| 5 | Virar para esquerda (eixo motor 1) frontal | (0, *) | (100, +) |
| 6 | Virar para esquerda (eixo motor 1) traseiro | (0, *) | (100, -) |
| 7 | Para trás | (100, -) | (100, -) |
| 8 | Virar para esquerda (próprio eixo) | (100, -) | (100, +) |
| 9 | Virar para direita (eixo motor 2) traseiro | (100, -) | (0, *) |

Tabela 5 – Intensidade e direção dos motores conforme estado. Asteriscos simbolizam motor sem direção

Integração de *joystick*

Para se fazer o controle da cadeira, o *hardware* utilizado no módulo Joystick, vide capítulo 2, foi acoplado usando uma rotação de 45 graus no sentido anti-horário. Isto foi feito para melhorar a interpretação dos dados. Esta translação do eixo XY dos potenciômetros do *joystick*, vide figura 31, para o novo eixo M1M2, vide figura 32, nos permite inserir os estados da tabela 4 e implementar estes estados de forma mais fácil.

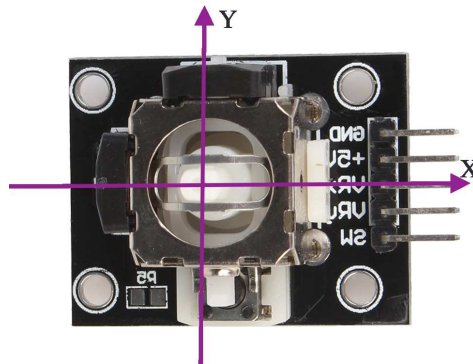


Figura 31 – Visão de *joystick* com eixos para propósito geral

4.3.6 Ponte H

No decorrer da produção do circuito da ponte H, foi utilizado duas portas AND e uma porta NOT para a implementação da seletora e assim garantir que não haverá acionamento de todos os transistores ao mesmo tempo.

Como não se pode acionar as duas entradas ao mesmo tempo de uma ponte H, devido o risco de curto circuito, houve a necessidade de desenvolver um circuito de segurança, que impedisse esse tipo de acionamento. O MSP gerará um sinal que dirá qual o sentido do motor e através do uso de portas lógicas do tipo NOT e AND esse controle é possível, como mostrado na figura 33.

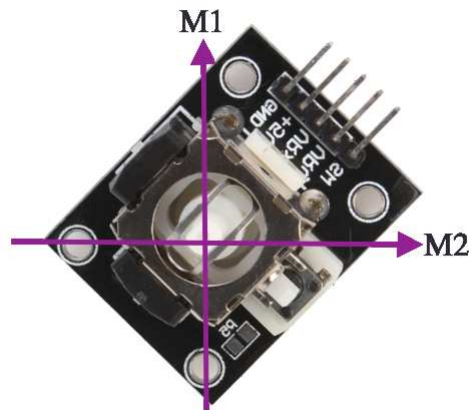


Figura 32 – Visão de *joystick* com eixos rotacionados

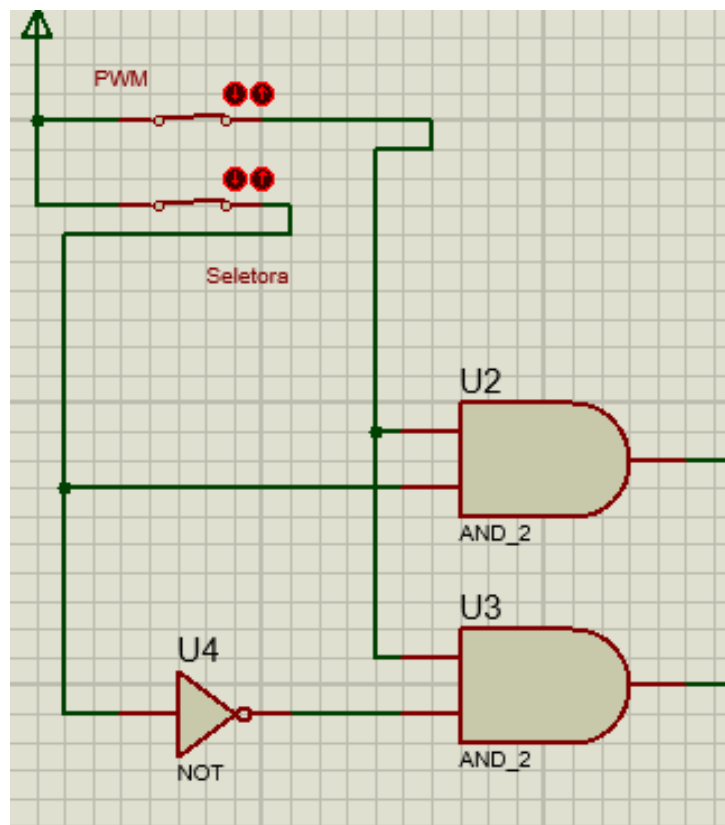


Figura 33 – Circuito para a implementação das portas seletoras

Foi necessário utilizar um dobrador de tensão no circuito, com ele foi possível garantir um VGS maior que 2V para polarização dos transistores MOSFET da ponte. Como a alimentação da ponte está restrita nos 12V teve-se que utilizar esse artifício para conseguir criar essa diferença de tensão nos terminais do transistor e polariza-lo.

O circuito do dobrador, representado na figura 34, possui um oscilador que gera

uma onda quadrada, que no caso é um CI 555, e para o controle do pulso temos os resistores R5 e R6 e o capacitor C4. Em C2 tem-se um capacitor inversamente polarizado o que faz com que esse carregue apenas quando a parte baixa da onda quadrada é ativada.

Durante o período da onda quadrada em alto, C3 descarrega na saída do diodo na parte negativa gerando um efeito que dobra a tensão, conforme pode ser visto na figura 34. É importante observar que o capacitor C2 não pode ser muito grande e nem o pulso do oscilador muito largo para que não haja uma descontinuidade muito grande no valor de tensão.

Esse circuito é necessário pois a tensão do circuito está limitada em 12V. Com isso não é possível conseguir um VGS maior que 2V nos transistores MOSFET da ponte H. Com o auxílio desse artifício muito utilizado na eletrônica consegue-se fazer a transformação de um tensão DC em uma tensão DC com o dobro de tensão, com isso tem-se 24V teóricos na saída do circuito dobrador de tensão, pois a tensão de entrada é cerca de 12V.

Dessa forma liga-se a saída do dobrador de tensão nos transistores Q7 e Q8 para eles alimentarem o Gate dos transistores MOSFET do circuito, como há perdas envolvidas, chegarão cerca de 22V nas portas G dos transistores, tornando possível haver uma diferença maior que a V_{TH} e polarizando os transistores da maneira correta e permitindo o funcionamento do sistema por completo.

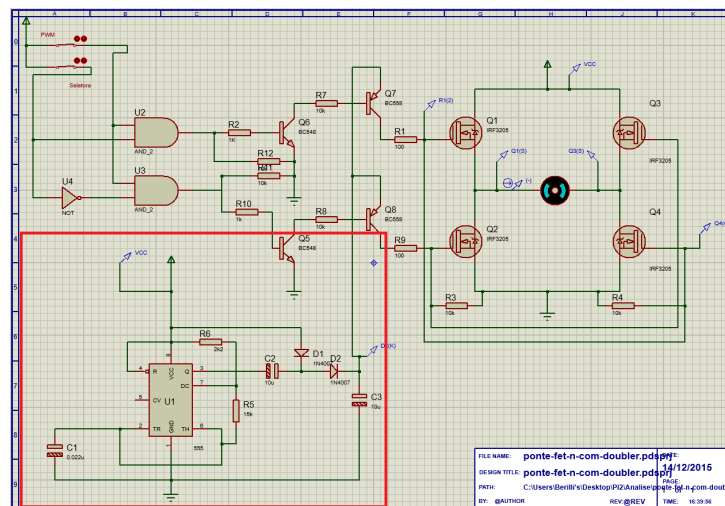


Figura 34 – Circuito elevador de tensão

Para facilitar e proteger o sistema, foi construído um distribuidor - uma placa que facilitará a conexão de todos os outros módulos ao sistema. Sendo assim, não será necessário que haja reduções de tensão tão drásticas nos módulos, pois essa já estará pronta no distribuidor.

Para a alimentação dos micro controladores da parte de controle da cadeira de rodas utilizou-se um banco de baterias (PowerBank), que possui uma saída USB de 5V de tensão, através dela alimentou-se uma LaunchPad do MSP-430 para realizar a regulação

da tensão de saída para 3,5V, desta forma foi possível alimentar o sistema responsável por realizar o controle dos motores.

Para a alimentação dos motores, foi realizada uma conexão através de cabos diretos da bateria para seus terminais. Essa saída será dupla, ou seja, cada motor terá sua alimentação individual, sendo que para proteção foi utilizado fusíveis automotivos inseridos nesses cabos, para que em caso de sobrecorrente, os motores não sejam danificados.

A ponte H também foi alimentada diretamente da bateria e possui fusíveis em sua alimentação. Caso haja algo de errado com o circuito, os fusíveis vão atuar, evitando assim a queima dos componentes da ponte H.

Versões da Ponte H

Foram feitas duas versões de ponte H. Na primeira versão da ponte H utilizava-se trilhas com cerca de 5 mm para os motores e transistores. Após alguns testes foi verificado que a espessura não suportava a corrente que os motores necessitam, as trilhas estavam soltando da placa.

Com isso foi necessário reestruturar a ponte H, então foi idealizado o paralelo de 2 pontes H para alimentar cada motor. Para testar o paralelo foi necessário conhecer a corrente que cada ponte estava puxando. Segundo as especificações do motor, a corrente que cada motor puxa é de 25A. Em teoria cada ponte em paralelo deveria estar com no máximo 12,5A em sua saída, porém a aferição dessa corrente é complexa, pois não tinha-se instrumento de medida que suportasse tamanha corrente. Dessa forma desenvolveu-se um sistema de medida usando a proteção contra sobre-corrente do sistema, que é constituída de fusíveis automotivos de 12V. Variando os fusíveis de 5A em 5A e esperando eles se romperem, teve-se uma estimativa que sem carga o sistema estava puxando entre 10 e 15A.

Após alguns testes, verificou-se que as trilhas continuavam não suportando a corrente quando colocava-se carga. Para solucionar o problema, foi montado um novo esquemático com as trilhas de grandes espessuras, 3,5cm, como na figura 36 para auxiliar na dissipação de calor do sistema. Usando os mesmo transistores, porém fora da placa e fixados diretamente no dissipador, mas com as ligações feitas através de cabos externos como mostrado na figura 35.

O circuito de controle foi mantido similar ao primeiro layout e foi feito algumas pequenas modificações na proteção da entrada do sinal do PWM do circuito para garantir que não haverá curto circuito no sistema.

As novas trilhas suportariam a corrente, contudo era necessário soldar o transistor, foi usado então fios para conectar os transistores a ponte H e ligados como mostrado na figura 36. Cada um dos quatro transistores, possui um Gate, que é um pino de controle, o Drain, que é a saída do transistor e o Source, que é a entrada. Foram enumeradas entradas

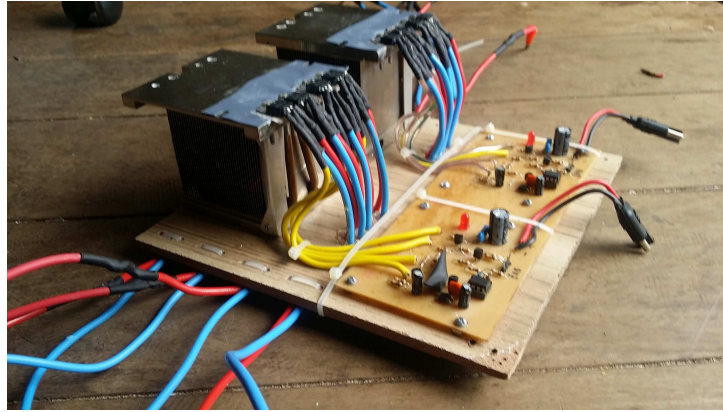


Figura 35 – Ponte H e dissipador

e saídas com os respectivos transistores, onde 1d equivale ao transistor 1 pino de Drain, 1s ao transistor 1, pino de Source e assim por diante. O pino de controle foi ligado direto a antiga formação da ponte H, já que essa possuía os devidos circuitos de ativar a ponte H e proteger os pinos de controle, usados no PWM.

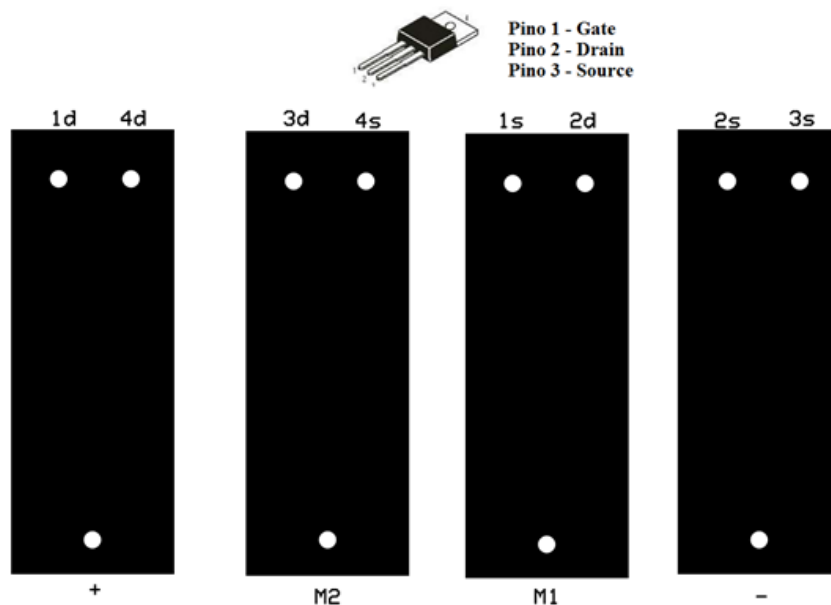


Figura 36 – Novo esquemático ponte H

4.3.7 Dissipador de calor

Os circuitos de potência modernos possuem elevado rendimento, porém a quantidade de calor gerada é uma preocupação. Atualmente os dispositivos operam com potências elevadas e no limite da capacidade de dissipação. O uso de um dissipador é tão importante quanto à parte elétrica do circuito.

O objetivo dessa sessão é fornecer subsídios para estabelecer critérios para o dimensionamento do sistema de dissipação do calor produzido por componentes eletrônicos,

especialmente semicondutores de potência da ponte H(transistores), buscando a proteção de tais componentes.

Considerando:

P_t = Potência a ser dissipada pelo transistor;

T_j = Temperatura de junção;

T_c = Temperatura de carcaça;

T_{amb} = Temperatura ambiente;

R_{jc} = Resistência térmica na junção [$\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$];

R_{ch} = Resistência térmica na carcaça [$\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$];

R_{ha} = Resistência térmica dissipador - ambiente [$\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$];

Onde T_j e R_{jc} são parâmetros do *Datasheet*. Foram utilizadas duas ponte H, sendo que cada uma possui 4 transistores IRF3205(Jameco Part Number 618089)([ELECTRONICS, 2015](#)):

$T_j = -55\text{ à }175\text{ }^\circ\text{C}$;

$R_{jc} = 0,75[\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}]$;

$R_{ch} = 0,5[\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}]$;

Assim podemos calcular R_{ha} como:

$$R_{ha} = \frac{(T_j - T_{amb})}{P_t} - R_{jc} + R_{ch} \quad (4.18)$$

A potência total dissipada é de 300W por cada ponte H, assim cada transistor recebe 75W. A temperatura ambiente considerada é de T_j como $40\text{ }^\circ\text{C}$, considerando a T_j como $130\text{ }^\circ\text{C}$, temos assim:

$$R_{ha} = \frac{(130 - 40)}{300} - 0,75 + 0,5 = 0,05 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (4.19)$$

Superfícies aletas, chamadas de dissipadores de calor são comumente utilizadas para o resfriamento de dispositivos eletrônicos. A energia dissipada por esses dispositivos é transferida por condução dos dispositivos de potência para os dissipadores e por convecção natural ou forçada dos dissipadores para o ambiente ([ÇENGEL, 2012](#), p. 434-439).

Uma das principais questões na escolha de um dissipador de calor é escolher entre um com aletas estreitamente espaçadas ou aletas amplamente espaçadas para uma determinada área da base. Um dissipador com menor espaçamento entre as aletas terá maior superfície de transferência de calor, mas o coeficiente de transferência de calor é menor devido a resistência que as aletas introduzem no fluxo do ar.

4.3.8 Indicador de Nível de Bateria

É importante saber o nível de bateria da cadeira de rodas, com isso é possível controlar sua autonomia e saber quando ela irá parar de funcionar. O indicador servirá para informar quando a bateria estiver acabando, para que se possa voltar para estação de recarga e recarregar a cadeira de rodas.

Foi utilizado um multímetro automotivo de bateria como mostrado na figura 37. Eles são comumente utilizados para medir as baterias auxiliares utilizadas em sons automotivos. Seu funcionamento baseia-se na medição da diferença de tensão nos polos da bateria, dessa forma indicando qual é a tensão da bateria. Quando a tensão cair a um nível crítico é quando os motores da cadeira de rodas irão parar de funcionar, no caso do motor do projeto, 9V. Quando o indicador chegar em 9V, o usuário deve retornar com a cadeira de rodas para que a mesma seja recarregada.

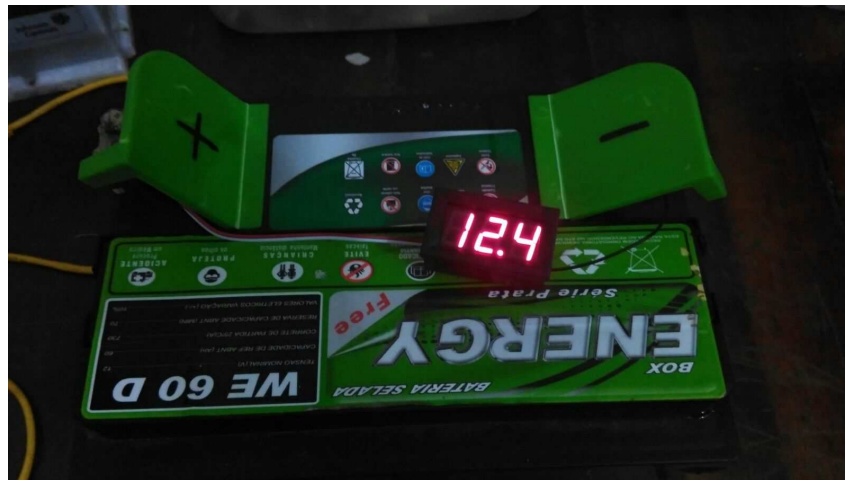


Figura 37 – Multímetro automotivo de bateria

5 Planejamento Financeiro

Um dos aspectos de grande relevância para o projeto é o custo. Nessa sessão faremos uma avaliação sobre o custo de fabricação de um protótipo funcional de um kit para automação de cadeira de rodas elétrica.

5.1 Arrecadação

Desde o início do projeto começamos a arrecadar um valor mensal, utilizando de uma estimativa inicial.

- Início da arrecadação = setembro
- Quantidade de meses de projeto = 4
- Valor = R\$50,00
- Quantidade de integrantes = 13
- Total a ser arrecadado = R\$2600,00

Com o amadurecimento e o conhecimento dos gastos reais do projeto esse valor se mostrou suficiente para custear o projeto.

5.2 Planejamento de Gastos

Na tabela 6, serão apresentados os custos finais de fabricação do protótipo.

| Quantidade | Componente | Preço Unitário |
|------------|-------------------------------------|----------------|
| Controle | | |
| 1 | Raspberry Pi B+ | R\$ 250,00 |
| 3 | MSP430G2553 | R\$ 20,00 |
| 1 | Joystick | R\$ 15,00 |
| 2 | Ponte H | R\$ 50,00 |
| | Componentes Reserva | R\$ 50,00 |
| 24 | Isolamento com mica e porca | R\$ 0,80 |
| 5 | resistência 1k4 | R\$ 0,15 |
| 3 | placa fenolíteo 25x25 | R\$18,00 |
| 8 | Transistor IRF 3205 | R\$ 3,90 |
| 4 | Capacitor eletrolítico 10 uF x 50 V | R\$ 0,30 |

| | | |
|--------------------|---|-------------|
| 2 | Capacitor eletrolítico 1000uF x 25 V | R\$ 0,65 |
| 2 | Capacitor eletrolítico 10uF x 100 V | R\$ 0,30 |
| 4 | diodo in 4007 | R\$ 0,20 |
| 4 | Transistor BC548 | R\$ 0,35 |
| 4 | Transistor BC558 | R\$ 0,30 |
| 2 | CI LM555 | R\$ 1,20 |
| 6 | Resistência 100R | R\$ 0,20 |
| 6 | Resistência 1k | R\$ 0,20 |
| 2 | Resistência 2k2 | R\$ 0,20 |
| 16 | Resistência 10k | R\$ 0,20 |
| 2 | Resistência 15k | R\$ 0,20 |
| 8 | Resistência 100k | R\$ 0,20 |
| 16 | Parafuso | R\$ 0,60 |
| 2 | Chicote de 2 vias | R\$ 6,50 |
| 2 | 74LS08 | R\$ 4,90 |
| 2 | 74LS04 | R\$ 4,00 |
| 1 | Caixa para joystick | R\$ 7,50 |
| 2 | RJ45 fêmea | R\$ 6,00 |
| 24 | Borne com porca | R\$ 1,50 |
| 24 | Plug Banana | R\$ 1,00 |
| 4 | Fusível 15A | R\$ 0,50 |
| 2 | Fusível 20A | R\$ 0,50 |
| 2 | Fusível 25A | R\$ 0,50 |
| 2 | Fusível 30A | R\$ 0,50 |
| 2 | Espaguete termo retrátil 4,5 mm | R\$ 3,90 |
| 1 | Fita isolante | R\$ 6,90 |
| 1 | cabo flexível 2,5 mm, 4 metros Vermelho | R\$ 3,00 |
| 1 | cabo flexível 2,5 mm, 2 metros Vermelho | R\$ 1,50 |
| 1 | cabo flexível 2,5 mm, 2 metros azul | R\$ 3,00 |
| 2 | cabinho flexível 2,5 mm, amarelo | R\$ 1,60 |
| 2 | cabinho flexível 2,5 mm, preto | R\$ 1,60 |
| 4 | Tubo de solda | R\$ 5,00 |
| | Subtotal | R\$ 770,55 |
| <i>Power Train</i> | | |
| 1 | Baterias SLA | R\$ 300,00 |
| 2 | Redutor MR com motor GPB 1:10 | R\$ 560,00 |
| 2 | Rodas para anexo | R\$ 75,00 |
| | Subtotal | R\$1.570,00 |
| Estrutura | | |

| | | |
|---|------------------|-------------|
| 1 | Solda e material | R\$300,00 |
| | Subtotal | R\$300,00 |
| | TOTAL | R\$2.640,55 |

Tabela 6 – Tabela de gastos totais por subgrupo

O custo total do projeto é de R\$ 2.640,55. Vale ressaltar que apesar do custo do protótipo ser alto, a nível industrial seria significativamente reduzido.

6 Problemas Encontrados

Esta seção tem como foco a explicação dos problemas encarados e das soluções adaptadas, durante o desenvolvimento do projeto. Tanto como grupo quanto em subdivisões específicas feitas.

6.1 Geral

Dificuldade na definição das atividades da *Sprint*

- Problema: De uma forma geral, o grupo superestimou as atividades nas sprints, tornando muito difícil a conclusão das atividades propostas para a sprint.
- Solução: Como solução granularizamos as atividades reduzindo-as para que fosse possível realizá-las no tempo de uma sprint e durante a mudança, que durou cerca de 3 sprints, calibramos os erros e acertos na retrospectiva feita ao final de cada sprint.

Redistribuição do pessoal da área de *Power Train* para a área de Controle e Estrutura

- Problema: Realocar os componentes de forma a não ficarem ocioso em alguma atividade, pois as atividades envoltas para suas respectivas áreas já haviam terminado.
- Solução: Relocar os componentes conforme maior expertise dos mesmos na área de Controle e Estrutura.

Gastos com materiais

- Problema: Na fase inicial do trabalho muitas pesquisas foram feitas e os materiais necessários levantados, porém não era de conhecimento o quanto gastaríamos com o projeto.
- Solução: Desde o início já começamos a arrecadar dinheiro dos integrantes e com o amadurecimento do projeto conseguimos mensurar de forma mais real qual seria o custo do projeto sendo possível assim um planejamento financeiro melhor.

6.2 Controle

Linguagem de programação

Mesmo com a experiência do grupo dos alunos de *software*, houve problemas em relação ao Python, como: entendimento da exportação relativa de classes em outras pastas, mudança da versão 2.7 para a versão 3.4 e problemas de indentação relacionado a IDE de desenvolvimento.

6.2.1 Ambiente de Desenvolvimento

Testes unitários do código-fonte

- Problema: Utilização do framework de teste de forma correta.
- Solução: Olhar a documentação do framework e aprender como utilizar.

Mock

- Problema: Entendimento de como utilizar o "Mock" para fingir que o Hardware existe.
- Solução: Conversa entre grupos da disciplina de Projeto Integrador 2 e leitura e compreensão da documentação.

Cobertura de código em Python

- Problema: Como fazer cobertura de código para Python.
- Solução: Depois de realizar pesquisas o Coverage foi escolhido e instalado inicialmente no repositório local para teste e depois que confirmada a eficiência foi instalado na Raspberry Pi.

Utilização de múltiplas funcionalidades do microcontrolador

- Problema: Como gerar dois pulsos PWM independentes com atualização de *duty cycle* por conexão serial.
- Solução: Leitura detalhada da documentação do microcontrolador utilizado e pesquisa em diversos fóruns.
- Problema: Como saber se os dois pulsos PWM implementados estariam corretos.
- Solução: Foi utilizado um osciloscópio nas saídas do microcontrolador, e feita a aferência dos mesmos.

6.2.2 Ambiente físico

SSH

- Problema: O acesso via SSH é feito através de um cabo de rede, no qual somente uma máquina por vez pode acessar. Isso ocasiona um problema de ociosidade na equipe: enquanto um componente o utiliza, os outros 2 ficam ociosos.
- Solução: Utilizar o Raspberry conectado a um roteador Wi-Fi, que permite a todos os integrantes utilizarem do ambiente mutualmente via rede sem fio.

Mudança de Sistema Operacional

- Problema: Problema relacionado: Pretende-se utilizar um ambiente para teste que possibilite o desenvolvimento de forma completa mediante o possível para o projeto. Para isto é necessário o uso de testes unitários e do "Mock", descobriu-se que o primeiro Sistema Operacional instalado (Raspbian Wheezy) não atende para a utilização do "Mock".
- Solução: Um outro Sistema Operacional foi instalado (Raspbian Jessie), por possuir nativamente um ambiente de testes robusto que possibilite o uso de testes unitários e "Mock".

Quantidade de microcontroladores a serem utilizados

- Problema: Unificar todo o controle no Raspberry Pi diminui a confiabilidade do sistema, além disso, ele não tem conversores analógico/digital, necessários para o sistema de controle.
- Solução: MSPs dedicados a cada componente foram utilizados, por sua facilidade em implementar conversores AD de vários canais, PWMs e por ser de fácil comunicação com o Raspberry Pi via serial UART.
- Problema: Sincronização do envio dos dados com os pulsos de PWM.
- Solução: A formatação do envio de dados foi modificada. A formatação anterior seguia o modelo: "(Informação potenciômetro 1)(Informação potenciômetro 2)(\ n)", sendo mudada para: "(Valores Pares potenciômetro 1)(Valores Impares potenciômetro 2)". Baseado nisso, houve uma melhora ao se receber os dados.

Velocidade de inicialização do sistema

- Problema: Demora na conexão entre os microcontroladores e a Raspberry Pi.

- Solução: Como os componentes são independentes e a Raspberry Pi está redundante no atual incremento do projeto, optou-se por retirá-la para uma maior desempenho.

6.2.3 Arquitetura

Desenvolvimento

- Problema: Esta arquitetura possui 2 formas de serem montadas: Paralela ou Sequencial. A Paralela nos permite ter várias *threads* acontecendo simultaneamente para diferentes situações. A Sequencial acontece de forma sucessiva em somente uma *thread*. Houve a dúvida técnica de qual destas implementar em tempo de apresentação do produto. Existiu o temor de não se obter uma Arquitetura, caso fosse usado a solução Paralela.
- Sugestão de Solução 1: Foi sugerido que uma montagem da solução sequencial fosse montada para se fazer uma avaliação, em relação ao tempo de resposta que seria entre o usuário fazer o movimento com o Joystick e o motor responder ao movimento.
- Sugestão de Solução 2: Foi sugerido que a contabilização do tempo de execução (delay dos componentes eletrônicos + complexidade do *software*) fosse feita, para analisar e ter certeza de que a solução Sequencial diferenciaria muito da solução Paralela.
- Solução: Foi feita a implementação da arquitetura Paralela.
- Problema: A arquitetura Paralela não está com as *threads* devidamente sincronizadas.
- Solução: Foi descoberto que o problema de sincronização pode ser resolvido com a solução produtor/consumidor.

6.2.4 Ponte H

Acionamento das Entradas da Ponte H

- Problema: As entradas da ponte H não podem ser acionadas ao mesmo tempo, pois caso sejam acionadas haverá um curto circuito no sistema e não haverá diferença de tensão nos terminais do motor.
- Solução: Para o risco de curto circuito, caso as entradas fossem acionadas ao mesmo tempo, desenvolveu-se uma lógica na entrada utilizando portas lógicas do tipo AND e NAND. Isso foi feito para garantir que não haverá acionamento das duas entradas da ponte H ao mesmo tempo.

Confecção dos Circuitos

- Problema: No desenvolvimento da PCB: Por algumas placas estarem velhas, ao serem esquentadas o esquemático do papel não estava sendo transferido e o Fenolíteo descolou do cobre.
- Solução: Foram compradas placas novas de Fenolíteo e foi feita a mudança de papel coque para papel fotográfico
- Problema: Largura da trilha dos transistores da ponte H, quando ligada nos motores do sistema, após um tempo elas esquentavam e descolavam do fenolíteo, desta forma rompendo a ligação.
- Solução: Dimensionar e desenvolver uma placa de circuito impresso para ligar apenas os transistores.
- Problema: A ponte H é um circuito de potência, e os seus transistores esquentam muito. Como o circuito puxa uma alta corrente, os transistores MOSFET superaquecem. Os transistores MOSFET 3205 podem operar em até 175°C, com uma temperatura tão elevada ele estava dessoldando os componentes ao redor do circuito.
- Solução: Colocar os transistores do lado de fora das placas de fenolíteo e em dissipadores devidamente dimensionados.

Simulação

- Problema: Para fazer os testes da ponte H era necessário um PWM nas entradas do circuito, e na simulação não era possível fazer o sinal de PWM com um microcontrolador. Para testar o circuito completo era necessário utilizar a lógica das portas lógicas junto com os CI's correspondentes. Nas primeiras simulações os componentes corretos para a confecção não estavam sendo encontrados.
- Solução: A dificuldade de simulação foi superada com a mudança de *software* de simulação, pois nessa forma foi possível encontrar todos os componentes que eram necessários para simulação, e para gerar o PWM foi estudado formas de gera-lo utilizando circuitos integrados. Dessa forma foi possível testar o funcionamento.

6.2.5 Joystick

Aquisição de Joystick

- Problema: Inicialmente utilizamos um *joystick* de um controle de videogame (PlayStation 2). Este não se adequou às nossas necessidades.

- Solução: Adquirimos um joystick que tivesse conectores, facilitando assim a prototipagem e implementação.

Produção do Joystick

- Problema: Fazer modelo físico do módulo Joystick.
- Solução: Foi adquirida uma caixa plástica, na qual foi anexada o *joystick*, vide seção ?? para maiores detalhes.

6.3 Power Train

Escolha de um motor¹

- Problema: A escolha do melhor método de cálculo de potência necessária para mover o sistema completo (cadeira de rodas mais usuário) foi um problema devida a alta variedade de possibilidades, tornando-se muito indecisa a precisão dos cálculos.
- Solução: Após uma vasta pesquisa na literatura e com alguns professores da FGA, com o auxílio do *software* Matlab, foram feitas diversas simulações envolvendo as variáveis de projeto para a decisão do melhor conjunto.
- Problema: Motores de corrente contínua fornecem um baixo torque, através dos cálculos, observou-se que era preciso um torque alto.
- Solução: Foi necessário o uso de um redutor para atender as especificações matemáticas do projeto. A partir disso foi feita uma busca de mercado e optamos por encomendar um kit motor-redutor pronto

Eixo do conjunto moto-redutor

- Problema: Os primeiros conjuntos moto-redutor que foram analisados foram o de motor de para-brisas de carro, esses conjuntos não forneciam a velocidade especificada pelo projeto, porém foram úteis para testes de controle. E seria fácil acoplar a roda do sistema a esse conjunto devido ao seu design. Entre tudo, quando os motores reais do projeto chegaram, o eixo era muito curto e devido ao design seria impossível conectar diretamente as rodas
- Solução: Foi construído um novo eixo com o uso do torno mecânico para ligar a roda ao conjunto moto-redutor.

¹ Levando em conta o atendimento os requisitos velocidade-torque

6.4 Estrutura

Acoplamento

- Problema: O ponto mais importante a se considerar para que o projeto funcione de modo eficaz e robusta é a forma como o sistema se acopla a cadeira, pois o deslocamento foi feito através da rotação das rodas acopladas a mala, ou seja, caso a conexão não fique firme o deslocamento foi comprometido.
- Solução 1: Primeiramente se pensou em criar um sistema de garras que seriam presas a estrutura tubular da cadeira, o que seria eficaz e simples de ser feito, porem após conseguir cadeiras reais para análise foi constatado que não haveria como acoplar as garras a algumas cadeiras devido a forma como os fabricantes fixam o tecido que mantem o encosto para as costas no lugar. Então foi pensado em utilizar velcros que seriam baratos, fáceis de utilizar e se bem posicionados permitiriam uma boa fixação, mas após testados ficou claro que não seria possível manter a estrutura firmemente fixada, pois o velcro não previne alguns tipos de movimentos que a movimentação do sistema geraria.
- Solução 2: Em seguida foi pensado em uma forma de acoplamento que não fosse afetada por diferentes tipos de modos de montagem ou disposição de partes da cadeira. Tendo em mãos duas cadeiras de rodas reais e distintas notou se a presença de dois pontos livres para realizar o acoplamento. Com a solução em mente foi decidido criar um protótipo em PVC, devido ao baixo custo, para que fosse possível analisar de fato se o sistema de acoplamento idealizado seria eficaz. Após construída a estrutura foi constatada, então, a eficácia do sistema, que tem baixo custo, sem perder a resistência, praticidade e adaptabilidade aos parâmetros fixados pela NBR 9050.

Montagem

- Problema: O sistema superior de acoplamento estava consumindo uma quantidade de tempo muito elevada para a sua regulagem.
- Solução: foi construído um novo sistema de acoplamento para a parte superior, o novo sistema é semelhante ao antigo mas sua regulagem é muito mais veloz, a imagem [16](#) mostra esse novo sistema.
- Problema: Muito tempo para acoplar cadeiras;
- Solução: O lado do parafusos foi ajustado para melhor manuseio e uma outra ferramenta foi utilizada, diminuindo o tempo de acoplamento.

Falta de cadeira

- Problema: Não se tinha cadeiras de rodas disponíveis para teste da estrutura.
- Solução: Entramos em contato com os professores responsáveis pela cadeira de rodas presente no laboratório e conseguimos autorização para utilizá-la. Outras cadeiras foram conseguidas por meio de doações de terceiros.

Movimentação

- Problema: Ao se acoplar a estrutura foi percebido, tardiamente, que as rodas da estrutura e da cadeira de rodas não são concêntricas. Impossibilitando a movimentação da cadeira em torno do seu próprio eixo;
- Solução: Como a cadeira consegue realizar rotações, mesmo que não em torno do próprio eixo, manteve-se a solução, pois a mesma permite a realização de movimentos em espaços que atendem à NBR 9050 que especifica os espaços para cadeirantes.
- Problema: Devido a possibilidade de andar sobre superfícies inclinadas, foi constatado que era necessário modificar a parte traseira da estrutura para que ela não encostasse no chão quando o sistema estivesse entrando em um aclave.
- Solução: foi feita uma modificação na parte traseira, conforme a imagem ?? mostra, assim com a adição de uma coluna inclinada ao sistema, não há risco de arrasto da parte traseira.

Referências

- ABNT, A. B. D. N. T. *NBR 9050: Acessibilidade e edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos*. [S.l.], 2004. 47 p. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 31.
- ANDRADE, D. A. S. de. *Elementos Orgânicos de Máquinas II*. 2015. Citado na página 21.
- AÇOSPORT. *Aço sae 1020*. 2015. Disponível em: <<http://www.acosporte.com.br/aco-sae-1020>>. Citado na página 18.
- BARCELOS, A. et al. Sistema de controle e motorizaÇÃo de cadeira de rodas. *Associação Educacional Dom Bosco*, 2008. Citado na página 24.
- BECKER, M. *Aplicação de tecnologias assistivas e técnicas de controle em cadeiras de rodas inteligentes*. Tese (Doutorado) — UNICAMP: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2000. Citado na página 13.
- BERTONCELLO, I.; GOMES, L. V. N. Análise diacrônica e sincrônica da cadeira de rodas mecanomanual. *Revista Produção*, v.12 n.1, 2022. Citado na página 12.
- CLARK, L. L. *Design and Testing of a Quick-Connect Wheelchair Power Add-On Unit*. Dissertação (Mestrado) — Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997. Citado na página 12.
- CONITEC, C. N. de Incorporação de Tecnologias no S. *Relatório número 50 PROCEDIMENTO CADEIRA DE RODAS MOTORIZADA NA TABELA DE ÓRTESES, PRÓTESES E MATERIAIS ESPECIAIS NÃO RELACIONADOS AO ATO CIRÚRGICO DO SUS*. 8 de maio de 2013. Acessado em 7 de Setembro de 2015. Disponível em: <<http://conitec.gov.br/images/Incorporados/CadeiradeRodasMotorizada-final.pdf>>. Citado na página 17.
- DATASHEET IRF 3205 - International IOR Rectifier. 2001. Acessado em 28 de Outubro de 2015. Disponível em: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf3205.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- ELECTRONICS, J. *Datasheet IRF3205S*. 2015. Disponível em: <<http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/618089InternationalRectifier.pdf>>. Citado na página 60.
- Herbert A Everest e Harry C Jennings. *Folding wheel chair*. 1937. 2095411. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 23.
- F., I. *Ensaio de Fadiga por Flexão para Eixos Desenvolvidos com Diferentes Materiais*. 2014. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=51>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- FAVORIT. *Aços Comerciais Aço SAE 1040/45*. 2015. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-comerciais/aco-sae-104045>>. Citado na página 18.

FILHO, W. de B. V. et al. Desenvolvimento de kit para automação de cadeira de rodas convencional. *VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 2010. Citado na página 11.

G, M. *AÇO CONSTRUÇÃO MECÂNICA – SAE 1020*. 2015. Disponível em: <<http://www.ggdmets.com.br/aco-construcao-mecanica/sae-1020/>>. Citado na página 18.

HAMANAKA, M. H. M. O. Projeto e desenvolvimento de circuito de controle para cadeira de rodas. *Dissertação de Mestrado, UNICAMP*, 2002. Citado na página 11.

HAMANAKA, M. H. M. O.; DIAS, J. A. S. *Projeto e Desenvolvimento de circuito de controle para cadeira de rodas*. [S.l.], 2002. Disponível em: <<https://www.robocore.net/upload/ManualTecnicoBateriaUnipower.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 45.

INMETRO. 2015. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/>>. Citado na página 11.

JÚNIOR, Y. S. et al. Análise da propulsão em cadeira de rodas manual: revisão de literatura. *Fisioter. mov. vol.25 no.1*, 2012. Citado na página 11.

KAMPER, D. G. et al. A technique for quantifying the response of seated individuals to dynamic perturbations. *Journal of Rehabilitation Research and Development Vol. 37 No . 1*, 2000. Citado na página 41.

LOCKTON, D. Wheelchair drive. 2004. Disponível em: <http://www.danlockton.co.uk/transport/mobility/Brunel_Wheelchair_Drive_public.pdf>. Citado na página 11.

MCGUIRE, M.; JENKINS, O. C. *Creating Games: Mechanics, Content, and Technology*,. [S.l.]: A K Peters, Ltd., 2009. Citado na página 24.

MEC060 disponível em: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/2829>. *Motores de Corrente Contínua*. 2015. Citado na página 46.

MEGGIOLARO, M. A.; GIRASAS, I. T. *PROJETO E CONTROLE DE UMA CADEIRA DE RODAS AUTOMATIZADA INTELIGENTE COM SENSORES DE ULTRASSOM*. 2011. Citado na página 20.

RASPEBERRY Pi Foundation. 2015. Acessado em 11 de Setembro de 2015. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org>>. Citado na página 25.

(SDH/PR), S. N. d. P. d. D. d. P. c. D. S. e. C. G. d. S. d. I. s. a. P. c. D. Secretaria de Direitos Humanos da Presidência da R. *Cartilha do Censo 2010 - Pessoas com Deficiência*. 2012. Disponível em: <<http://www.pessoacomdeficiencia.gov.br/app/sites/default/files/publicacoes/cartilha-censo-2010-pessoas-com-deficiencia-reduzido.pdf>>. Citado na página 11.

SHEPARD, D. S.; KAREN, S. L. *The Market for Wheelchairs: Innovations and Federal Policy (Health Technology Case Study 30)*. [S.l.: s.n.], 1984. Citado na página 12.

SILVA, J. F. da. Padrões de propulsão para cadeiras de rodas e seus fatores de desempenho. *Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, SP*, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

SOUZA, J. B. B. de. *Concepção da estrutura do sistema tecnológico de uma cadeira de rodas inteligente adaptada ao utilizador*. Dissertação (Mestrado) — FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

UNITTEST — Unit testing framework. 2015. Acessado em 22 de Outubro de 2015. Disponível em: <<https://docs.python.org/3/library/unittest.htm>>. Citado na página 26.

UNITTEST.MOCK — mock object library. 2015. Acessado em 22 de Outubro de 2015. Disponível em: <<https://docs.python.org/3/library/unittest.mock.html>>. Citado na página 26.

WOLF(92), S. R. V. apud Perry e. *Arquitetura de Software*. 2015. Acessado em 22 de Outubro de 2015. Disponível em: <<http://www.inf.ufpr.br/silvia/ESNovo/projeto/pdf/IntroduzArquiteturaAI.pdf>>. Citado na página 26.

WOUDE C. GEURTS, e. a. L. H. V. van der. Measurement of wheelchair rolling resistance with a handle bar push technique. 2003. Citado na página 43.

YAMAGUTI, H. Acionamento de motores de uma cadeira de rodas elétrica de baixo custo. *Dissertação de Mestrado, São Carlos, SP*, 2010. Citado na página 46.

ÇENGEL, Y. A. *TRANSFERENCIA DE CALOR E MASSA*. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2012. Citado na página 60.

Apêndices

APÊNDICE A – Sprints Realizadas

Foi utilizado o *trello* para organizar as *sprints*. As figuras seguintes mostram a evolução e o andamento destas *sprints*.

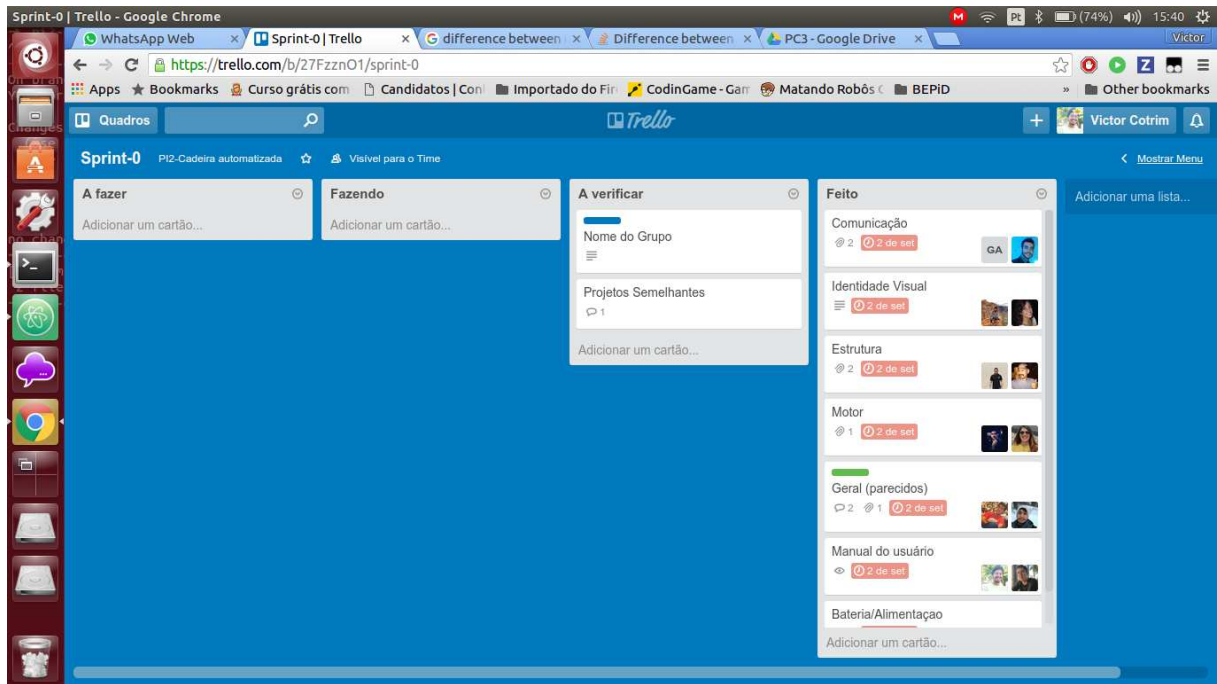


Figura 38 – Sprint-0

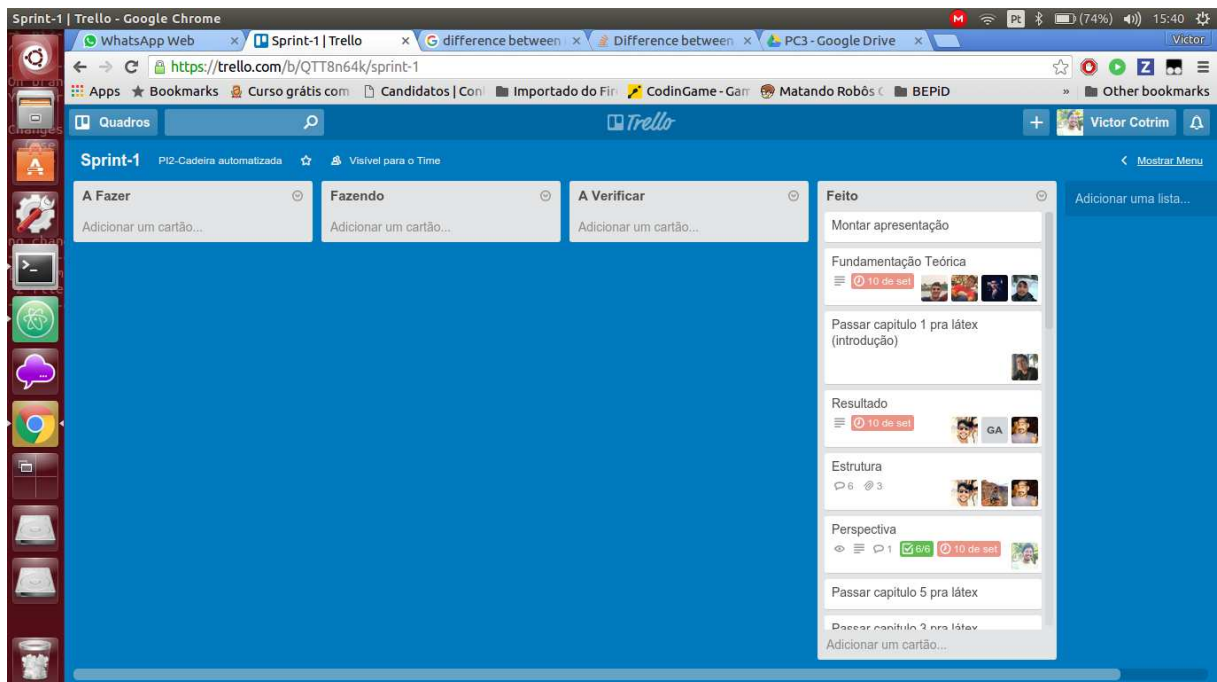


Figura 39 – Sprint-1

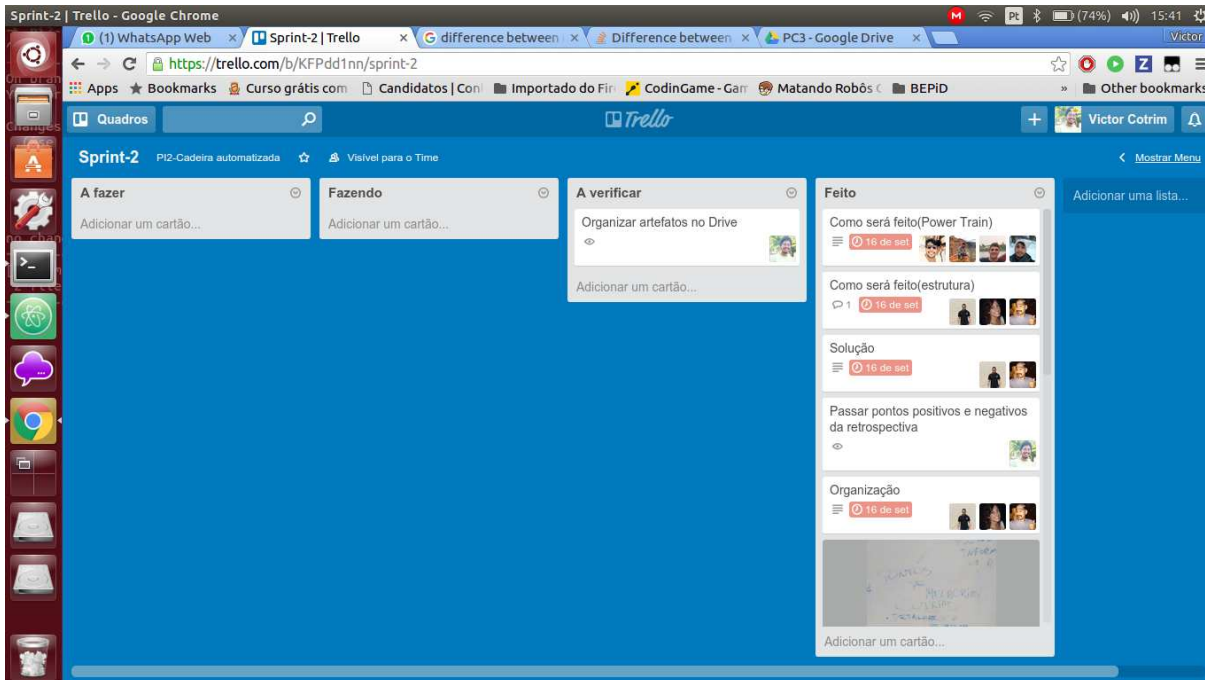


Figura 40 – Sprint-2

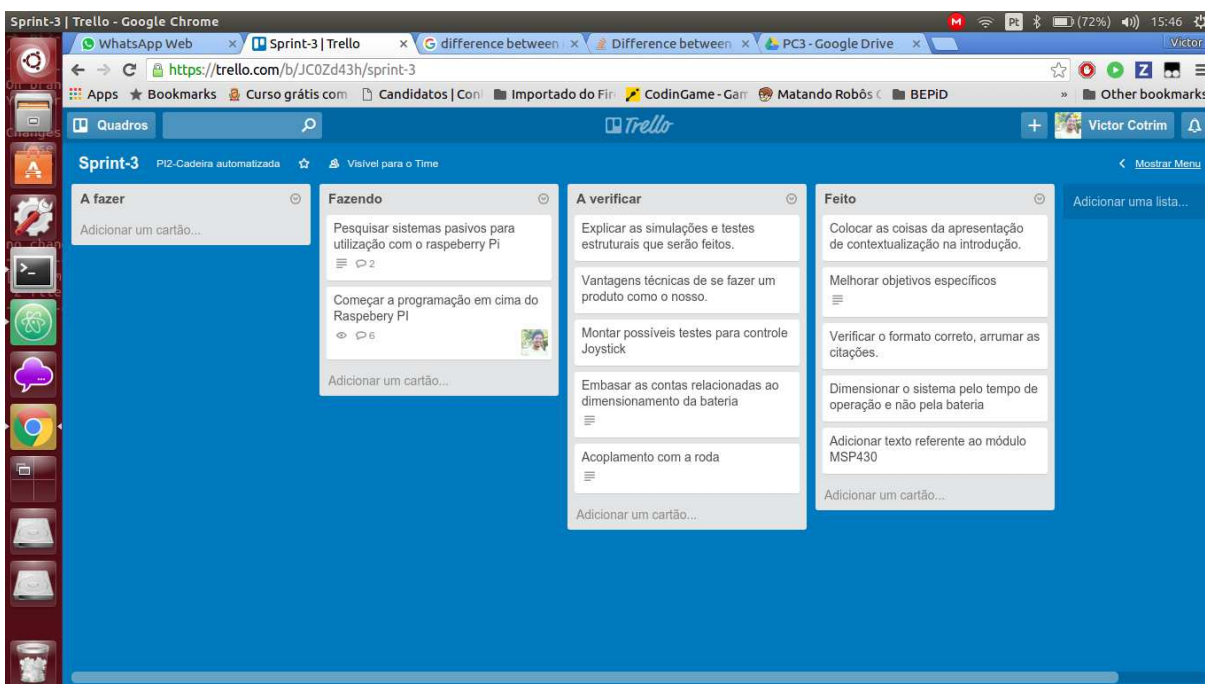


Figura 41 – Sprint-3

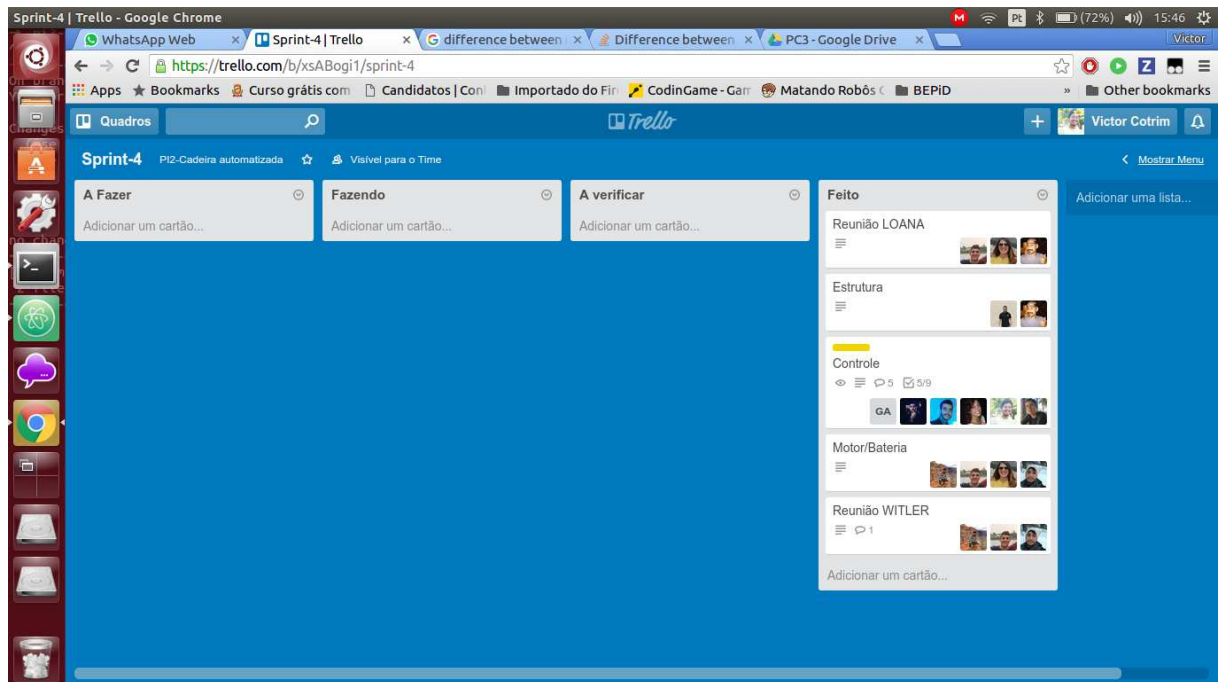


Figura 42 – Sprint-4

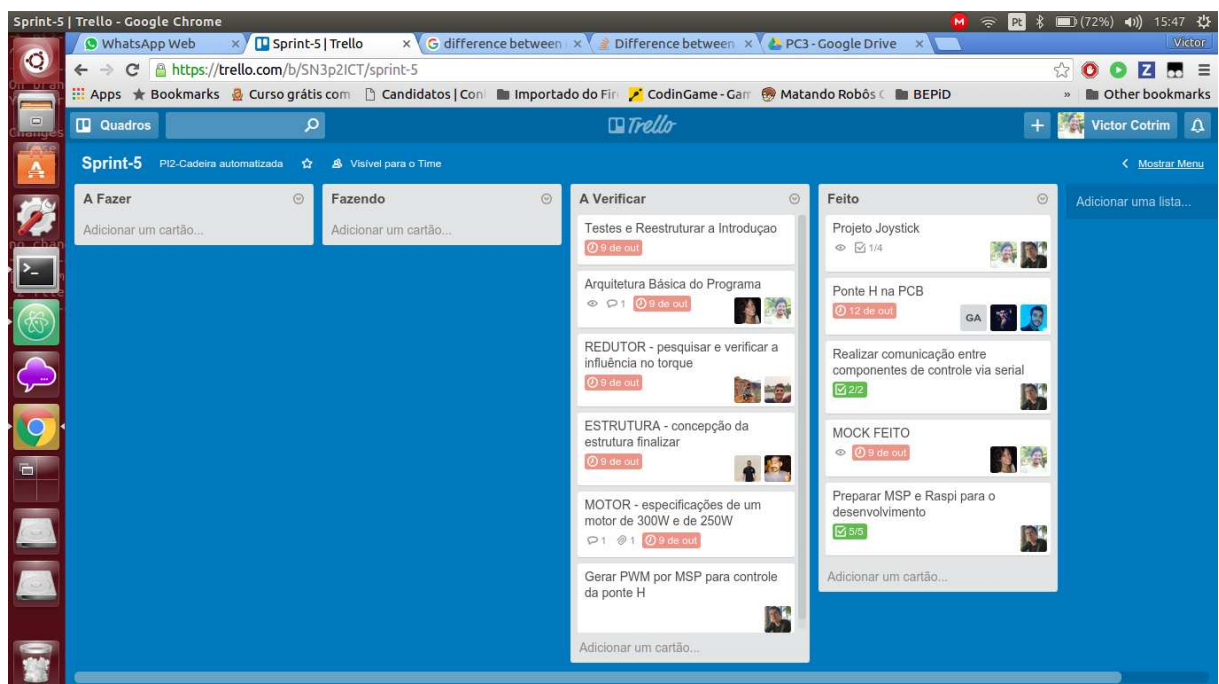


Figura 43 – Sprint-5

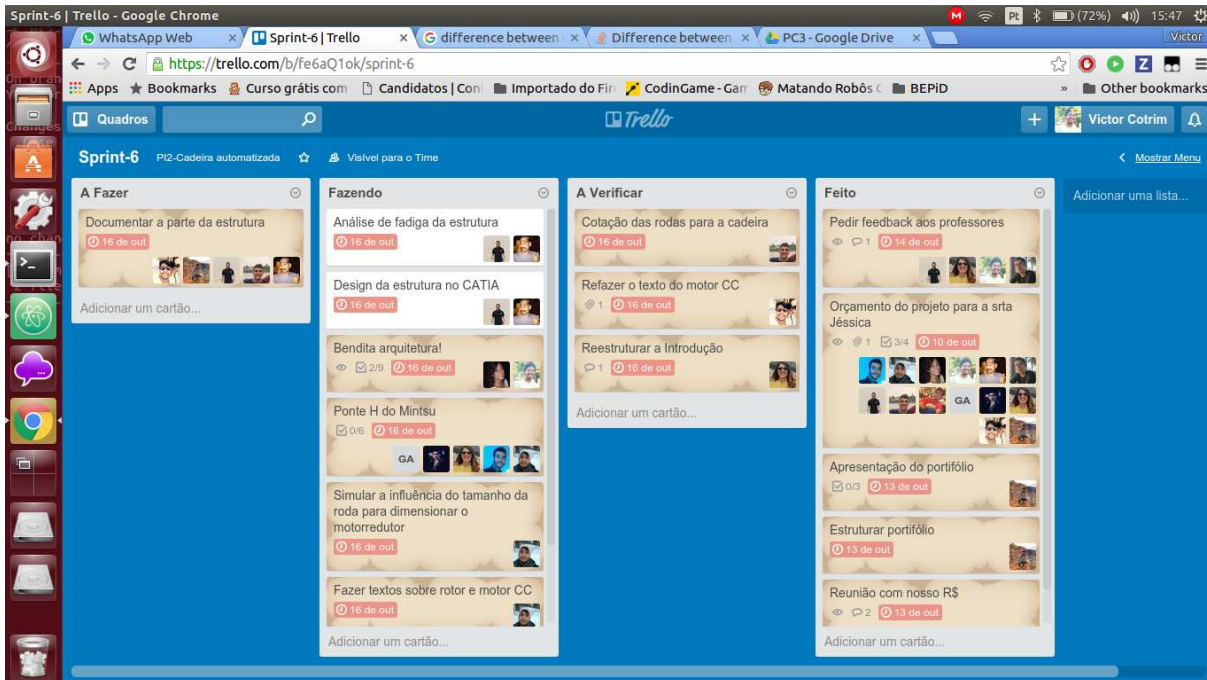


Figura 44 – Sprint-6

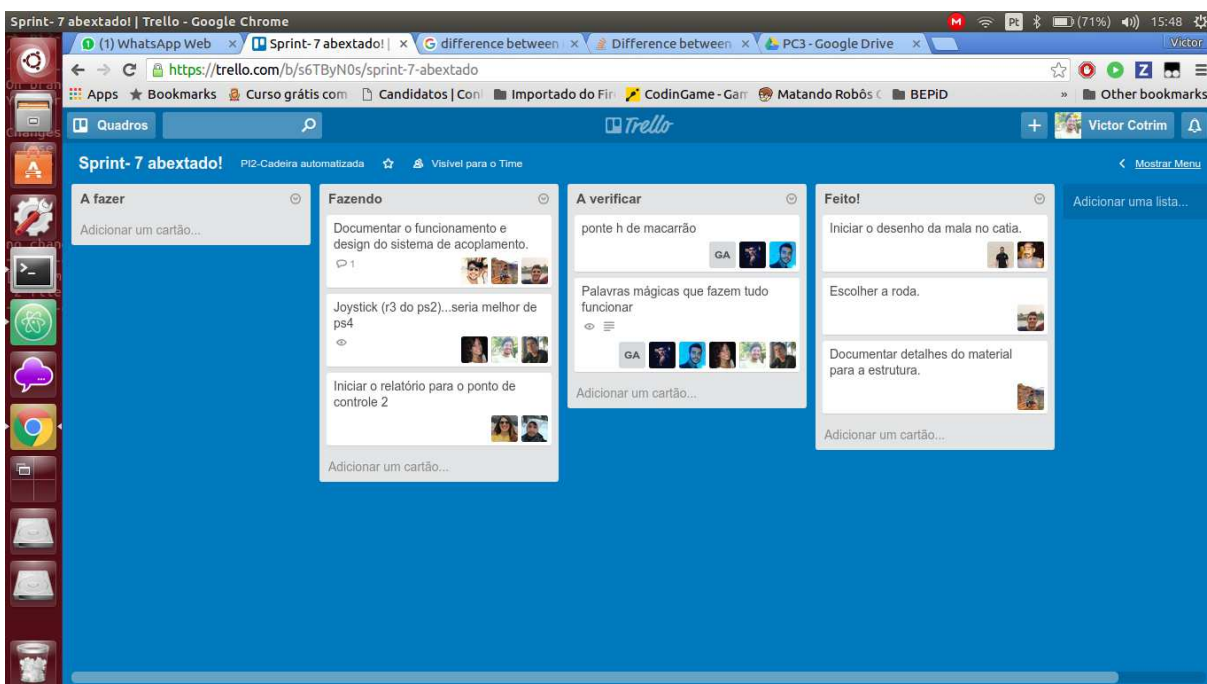


Figura 45 – Sprint-7

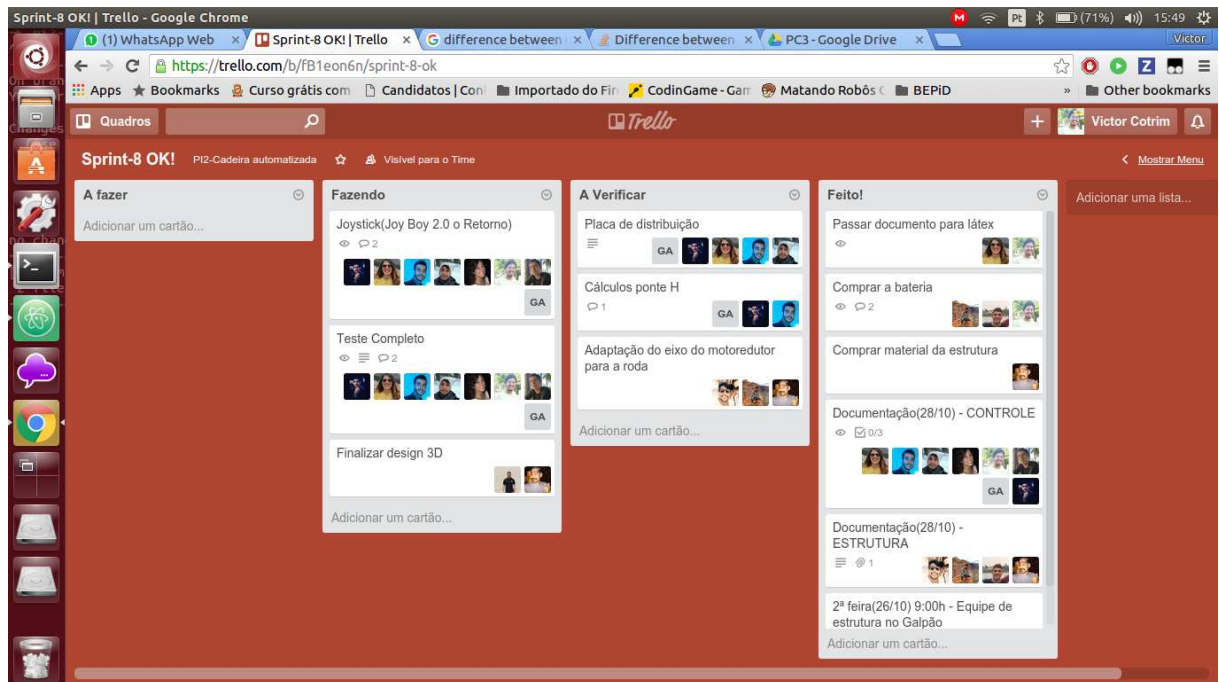


Figura 46 – Sprint-8

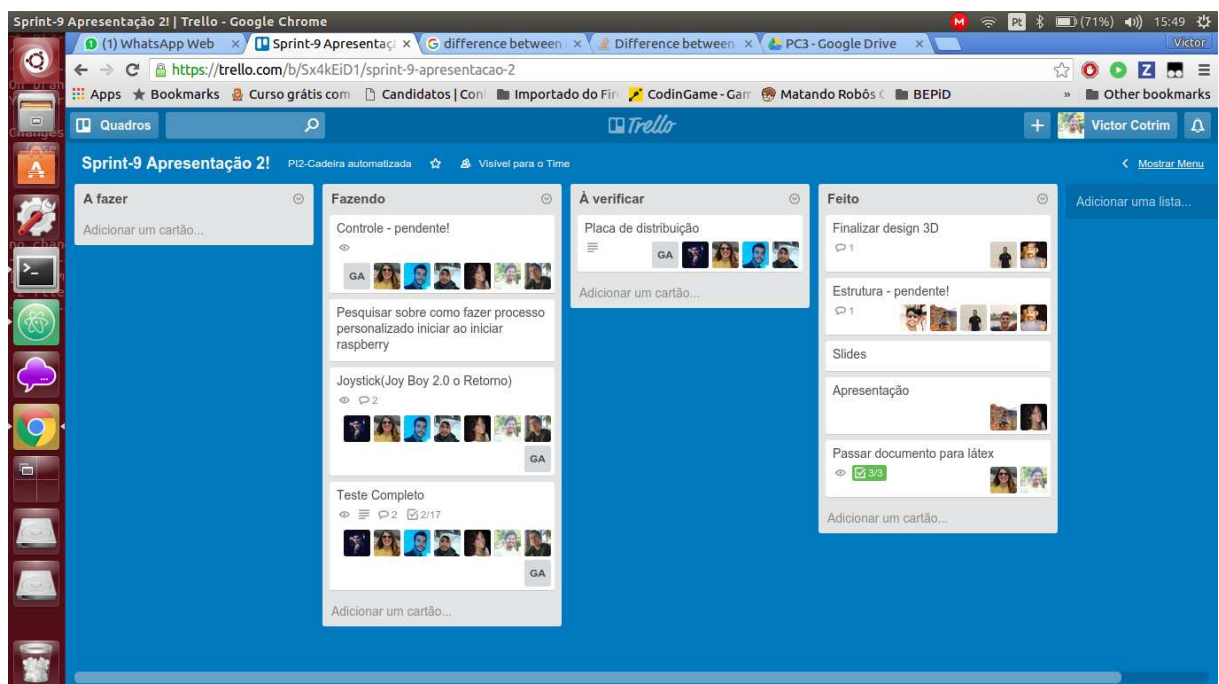


Figura 47 – Sprint-9

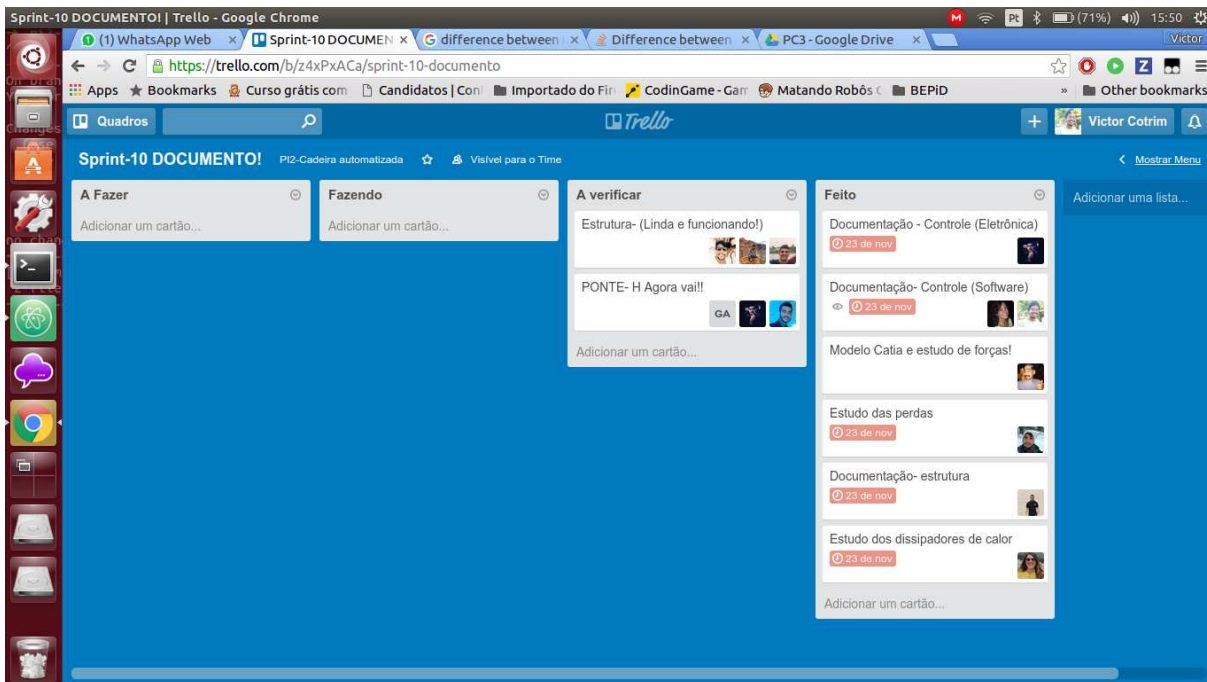


Figura 48 – Sprint-10

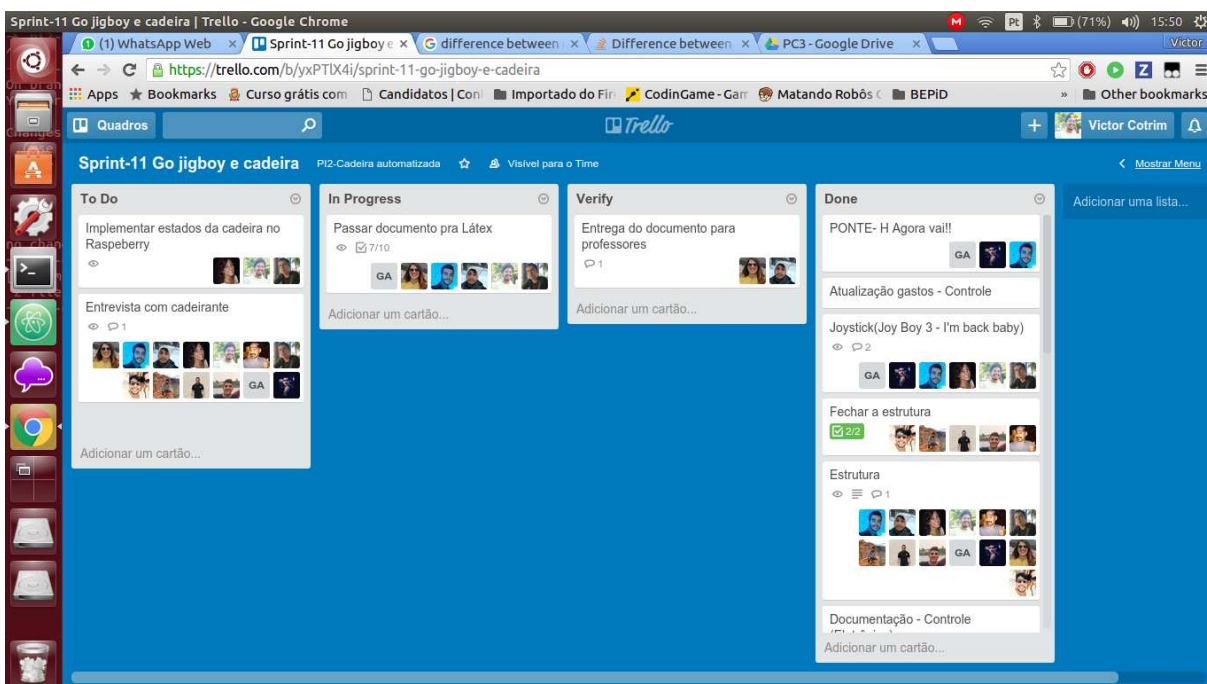


Figura 49 – Sprint-11