

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DALTON YUZO ISHIZAKI

RENAN VIEIRA DIAS

Desenvolvimento de um Patins Motorizado

São Paulo

2015

DALTON YUZO ISHIZAKI 7626720

RENAN VIEIRA DIAS 7206270

Desenvolvimento de um Patins Motorizado

Monografia apresentada no Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Engenheiro.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lobo Lustosa Cabral

São Paulo

2015

Catálogo-na-publicação

Ishizaki, Dalton Yuzo

Desenvolvimento de um Patins Motorizado / D. Y. Ishizaki, R. V. Dias --
São Paulo, 2015.

84 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.TRANSPORTE INDIVIDUAL 2.TELEFONIA MÓVEL 3.PATINAÇÃO
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t. III.Dias, Renan Vieira

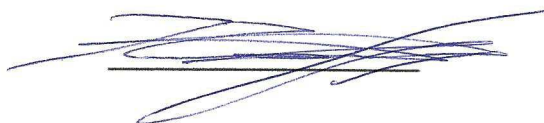
Este relatório é apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É o produto do nosso próprio trabalho, exceto onde indicado no texto. O relatório pode ser livremente copiado e distribuído desde que a fonte seja citada.

Dalton Yuzo Ishizaki



18 / 11 / 2015

Renan Vieira Dias



18 / 11 / 2015

RESUMO

Este projeto consiste em desenvolver um protótipo de patins motorizado com o objetivo de ser um meio de transporte e entretenimento. O projeto tem foco na portabilidade do equipamento e na realização de deslocamentos de curtas e medias distancias com a velocidade de uma pessoa correndo. Os comandos do usuário são realizados por meio de um telefone móvel, que através de um aplicativo transmite os comandos via Bluetooth para o sistema de controle do patins.

Palavras-chave: Patins, Motorizado ,Transporte, Telefone Móvel.

ABSTRACT

This project asserts as the development of a motorized roller skate prototype for an option of transportation and entertainment. The project focus on the portability of equipment and the capacity of moving short to medium distances with the speed of a person running. User commands are performed through a mobile phone, the mobile app transmits commands through Bluetooth to the control system of the roller skate.

Keywords: Roller Skate , Motor , Transport, Mobile Phone

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Esquema geral do sistema elétrico e de controle.....	20
Figura 2 - Esquema geral do sistema mecânico.....	20
Figura 3 - Modelo cinemático.....	23
Figura 4 - Diagrama de corpo livre.....	23
Figura 5 - Modelo elétrico do motor de corrente continua.....	25
Figura 6 - Banebots P60. Fonte: RobotShop (2015a).....	30
Figura 7 - Motor RS540. Fonte: RobotShop (2015b).....	30
Figura 8 - Motor AndyMark 9015 com redutor planetário. Fonte: RobotShop (2015c).....	32
Figura 9 - Turnigy Aerodrive SK3 - 6374- 192kv. Fonte: Hobbyking (2015a).....	33
Figura 10 - Turnigy Aerodrive SK3 - 5055 - 280kv. Fonte: Hobbyking (2015b).....	34
Figura 11 - Turnigy Aerodrive SK3 - 4250 - 500kv. Fonte: Hobbyking (2015c).....	35
Figura 12 - Polias dentadas e correias sincronizadoras. Fonte: Correias Schneider (2015).....	41
Figura 13 - Roda OXELO Diâmetro 70mm.....	43
Figura 14 - Patins In Line.....	45
Figura 15 - Patins Quad Line.....	45
Figura 16 - ZIPPY Flightmax 4000mAh 6S1P 20C.....	47
Figura 17 - Hobbyking Red Brick 70A ESC.....	48
Figura 18 - Arduino Uno.....	49
Figura 19 - Modulo HC-06 Bluetooth.....	49
Figura 20 - Layout da interface no celular.....	51
Figura 21 - Diagrama de componentes do celular.....	52
Figura 22 - Fluxograma do programa do controlador.....	53
Figura 23 - Diagrama de componentes do Arduino.....	54
Figura 24 - Disposição dos componentes da estrutura.....	56
Figura 25 - Disposição da estrutura de suporte dos componentes.....	57
Figura 26 - Vista lateral e frontal do patins com a estrutura montada.....	58
Figura 27 - Disposição dos componentes da transmissão de movimento.....	59
Figura 28 - Polias modificadas.....	59
Figura 29 - Vista lateral e inferior do protótipo.....	60
Figura 30 - Patins em equilíbrio de velocidade com uma esteira.....	61
Figura 31 - Teste de aceleração Posição inicial.....	61
Figura 32 - Teste de aceleração Posição final.....	62
Figura 33 - Testes com usuários na Faixa de 60kg.....	63
Figura 34 - Inicialização das Variáveis.....	67
Figura 35 - Seleção de Bluetooth Disponíveis.....	68
Figura 36 - Conectar ao dispositivo Bluetooth Selecionado.....	68
Figura 37 - Desconectar a conexão Bluetooth.....	69
Figura 38 - Iniciar Sistema de Velocidade.....	69
Figura 39 - Parar Sistema de Velocidade.....	70
Figura 40 - Aumento de Velocidade do Patins.....	70
Figura 41 - Diminuição da Velocidade do Patins.....	70
Figura 42 - Envio de Sinal via Bluetooth.....	71
Figura 43 - Parada Emergencial.....	71

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Meios de transporte distribuídos por categoria de tamanho.	14
Tabela 2 - Listagem de soluções avaliadas.	29
Tabela 3 - Características operacionais do motor RS540 e os requisitos de projeto.	30
Tabela 4 - Características da solução.	31
Tabela 5 - Características operacionais do motor AndyMark com redutor e os requisitos de projeto.	32
Tabela 6 - Características da solução.	32
Tabela 7 - Características do motor.	33
Tabela 8 - Características do motor.	34
Tabela 9 - Características do motor.	36
Tabela 10 - Divisões e subdivisões de requisitos.	37
Tabela 11 - Definição das notas.	37
Tabela 12 - Notas atribuídas para os diversos requisitos de cada solução.	39
Tabela 13 - Nota ponderada para cada solução.	40
Tabela 14 - Classificação de soluções segundo a soma das notas ponderadas de cada requisito.	40
Tabela 15 - Especificações das polias.	42
Tabela 16 - Especificação da correia.	42
Tabela 17 - Listagem de soluções avaliadas.	44
Tabela 18 - Notas das soluções por critérios.	46
Tabela 19 - Notas totais das soluções.	46
Tabela 20 - Lista de componentes da estrutura.	56
Tabela 21 - Lista de estruturas de suporte.	57
Tabela 22 - Lista de componentes da transmissão de movimento.	59
Tabela 23 - Teste de velocidade com esteira.	61
Tabela 24 - Custos do protótipo.	64

Lista de Símbolos

M	$[kg]$ massa do usuário e do patins
ω_R	$[rpm]$ velocidade de rotação das rodas
ω_M	$[rpm]$ velocidade de rotação do motor
v	$[km/h]$ velocidade do usuário
R	$[mm]$ raio da roda
α	$[^\circ]$ ângulo da rampa
X, Y, Z	eixos coordenados
$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$	vetores unitários
T_R	$[N.m]$ torque na Roda
T_M	$[N.m]$ torque do Motor
n	fator de redução da transmissão
P	$[N]$ força peso
g	$[m/s^2]$ aceleração gravitacional
F_{at_M}	$[N]$ força de atrito na roda motorizada
F_{at_L}	$[N]$ força de atrito na roda livre
N_M	$[N]$ força normal na roda motorizada
N_L	$[N]$ força normal na roda livre
μ_s	coeficiente de atrito estático
μ_d	coeficiente de atrito dinâmico
μ_r	coeficiente de atrito de rolamento
V	$[V]$ tensão de alimentação do motor
I	$[A]$ corrente no circuito do motor
R_{int}	$[\Omega]$ resistência elétrica do motor
L	$[L]$ indutância do motor
E	$[V]$ tensão elétrica induzida pelo motor
K_v	$[rpm/V]$ constante de rotação do motor
K_t	$[(N.m)/(A.rad/s)]$ constante de torque do motor
C	$[C]$ Carga da bateria

Sumário

Lista de Ilustrações.....	9
Lista de Tabelas	10
Lista de Símbolos.....	11
1 Introdução	14
1.1 Estado da Arte	14
1.2 Objetivos	16
1.3 Motivação.....	16
1.4 Escopo	17
1.5 Metodologia	18
2 Desenvolvimento	18
2.1 Análise de Requisitos	18
2.2 Concepção do Sistema	19
2.3 Modelagem	21
2.3.1 Hipóteses.....	21
2.3.2 Modelo Cinemático	22
2.3.3 Diagrama de Corpo Livre.....	23
2.3.4 Modelo do Motor.....	25
2.3.5 Modelo da Bateria.....	26
2.3.6 Calculo de Torque e Velocidade de Rotação.....	26
2.4 Seleção de Motores e Redutores	28
2.4.1 Solução 1 - Banebots P60 Gearbox com Motor RS 540	29
2.4.2 Solução 2 - Motor AndyMark 9015 com Redutor Planetário.....	31
2.4.3 Solução 3 - Turnigy Aerodrive SK3 - 6374-192kv Brushless Outrunner Motor	32
2.4.4 Solução 4 - Turnigy Aerodrive SK3 - 5055-280kv Brushless Outrunner Motor	34
2.4.5 Solução 5 - Turnigy Aerodrive SK3 - 4250-500kv Brushless Outrunner Motor	35
2.4.6 Escolha do Motor e Redutor	36
2.5 Seleção da Transmissão	41
2.6 Seleção das Rodas	43
2.7 Seleção Estrutural do Patins.....	44
2.7.1 Solução 1 - Patins Modelo In Line	44
2.7.2 Solução 2 - Patins Modelo Quad Line.....	45
2.7.3 Escolha da Estrutura.....	46
2.8 Seleção da Bateria.....	47
2.9 Seleção do Acionador.....	48

2.10	Seleção do Microprocessador	48
2.11	Seleção do Receptor.....	49
2.12	Programação	50
2.12.1	Programação do Telefone Móvel.....	50
2.12.2	Programação do Controlador.....	53
2.13	Configuração do Circuito Elétrico.....	55
2.14	Projeto Mecânico do Patins	55
2.14.1	Projeto Estrutural	56
2.14.2	Projeto da Transmissão	58
2.15	Protótipo	60
2.16	Resultados	60
2.16.1	Velocidade.....	60
2.16.2	Aceleração.....	61
2.16.3	Inclinação	62
2.16.4	Carregamento.....	63
2.16.5	Autonomia.....	63
2.17	Custos do Protótipo.....	64
3	Conclusões.....	65
	Referências Bibliografia.....	66
	APÊNDICE A - Programação do Android.....	67
	APÊNDICE B - Programação do Arduino.....	72
	APÊNDICE C - Circuito Elétrico.....	77
	APÊNDICE D - Desenhos de Fabricação	79

1 Introdução

Veículos de transporte reduzem o esforço físico executado para a locomoção em longas distâncias, assim como reduzem o tempo utilizado para efetuar tais deslocamentos. Estes veículos utilizam tecnologias disponíveis atualmente para auxiliar o deslocamento das pessoas. Os tipos de transportes existentes podem ser vistos na Tabela 1. A utilização de veículos individuais de transporte motorizados de pequeno porte apresenta-se como uma forma alternativa de locomoção em comparação aos veículos individuais de médio e grande porte, pois necessitam de menos espaço para serem utilizados e armazenados, apresentam menor custo de aquisição e manutenção, e em aplicações específicas realizam as funções dos veículos individuais de maior porte.

Tabela 1 - Meios de transporte distribuídos por categoria de tamanho.

Sistemas de Transporte de Pessoas		
Porte Grande	Porte Mediano	Porte Individual
Ônibus	Carros	Bicicleta
Trem, Metrô e VLT	Motos	Skate
Navios	Jet-ski	Patins
Aviões	Snowmobile	Segway
Helicóptero		Patins Motorizado

Observa-se que os veículos individuais de pequeno porte são designados para funções específicas devido à sua limitação de velocidade e autonomia, abrangendo uma parcela do mercado de transportes não atingida por veículos de maior porte. O patins motorizado é utilizado em locomoções de médias e curtas distâncias, inclusive em áreas de circulação de pessoas.

1.1 Estado da Arte

Lim e Tamai (2007) apresentam um meio de transporte individual, utilizando um par de calçados motorizados. Esse protótipo utiliza motorização apenas no pé direito, que possui o sistema de controle e acionamento efetuados pelo usuário. A movimentação controlada pelo usuário ocorre pela distribuição do peso deste nas regiões do calçado, ou seja ao pressionar a região frontal do calçado aumenta-se a velocidade de rotação dos motores, e ao pressionar a região do calcanhar diminui-se essa velocidade. Esse sistema de acionamento é composto por dois sensores de força localizados na parte da sola do calçado,

um localizado na região frontal e outro na região do calcanhar. O sistema como um todo possui três partes: os calçados, um cinto, uma mesa com o computador e a fonte de alimentação. O cinto realiza a conexão de sinais e de energia entre os calçados e os componentes da mesa de trabalho por meio de cabos. O acionador do motor está preso ao cinto. A fonte de alimentação é um transformador ligado na rede elétrica local. O computador é utilizado para controle, recebimento, envio e interpretação de sinais. O fornecimento de energia é feito por meio do transformador. O calçado possui os sensores, o motor, o redutor e a transmissão, que são feitas por engrenagens cônicas, polias e correias. O sistema não possui mobilidade, uma vez que o comprimento dos cabos conectados à bancada limitam sua distância. Esse sistema utiliza um motor de corrente contínua de 150 W, atinge a velocidade máxima de 2 km/h, efetua movimento em locais com inclinação de até 10 graus, suporta uma pessoa de 58 kg e os dois calçados pesam 4,26 Kg.

Tarjan et al.(1994) apresentam o projeto de um par de calçados parcialmente rolantes com o objetivo de auxiliar a locomoção de pessoas com problemas de mobilidade. O sistema não é motorizado e depende de movimentos do usuário para o deslocamento. Quando não existe movimento do usuário as rodas travam e durante a movimentação ele se torna um calçado deslizante. Isso é feito por meio de um mecanismo de molas, que utiliza a distribuição do peso do usuário nas regiões do calçado para liberar ou travar a roda. Os testes deste sistema obtiveram uma velocidade média de 1,1 km/h.

O produto "spnKiX - Wearable Mobility", descrito por Treadway (2012), é um par de calçados motorizados disponível no mercado. O seu formato permite que o produto seja calçado por cima de outro calçado convencional. Cada calçado possui duas rodas em um único eixo, isso significa que o usuário possui uma pequena liberdade de rotação do pé. Isso permite ao usuário acionar os freios na região do calcanhar. Cada calçado possui um controlador, um motor e uma bateria. O dispositivo alcança a velocidade de 16 km/h. O acionamento do sistema é feito por um controle remoto que o usuário carrega na mão.

Chavand (2015) desenvolveu um projeto de um patins motorizado com design diferenciado que denominou de "Rollkers". A bateria, o motor, o sistema de redução e a roda formam um sistema compacto. O sistema de redução é feito entre a roda motorizada, que possui dentes de engrenagem na parte interna, e o motor, que tem em seu eixo uma engrenagem. Dessa

forma, o motor se encontra excêntrico ao centro da roda, criando a redução. O dispositivo alcança a velocidade de 11 km/h.

A patente de Lauren (2007), denominada "Battery Powered Remote Controlled, Motor Driven, Steerable Roller Skates", apresenta um projeto de patins com os dois calçados motorizados. Os comandos de controle do usuário são efetuados por meio de um controle remoto, que é carregado na mão. Os possíveis comandos do controle efetuam o ajuste de velocidade e de direção do movimento. O sistema de tração é formado por um motor e um redutor planetário conectados nas rodas traseiras. As soluções convencionais admitem que o usuário irá controlar a direção do movimento direcionando o calçado na direção desejada, contudo o sistema de direcionamento proposto ocorre pelo ajuste da direção das rodas. Esse ajuste é feito por um segundo motor que posiciona a direção do eixo das rodas.

A patente de Mckinzie (2009), denominada "Shoe with retractable Motorized Wheels", apresenta um projeto de um par de tênis motorizados com as rodas frontais livres e retráteis, que pode ser usado como tênis ou patins motorizado. O sistema inclui motor elétrico, redução de engrenagem e um mecanismo retrátil. O tênis possui conexões elétricas que fazem a ligação da bateria encontrada no cinto utilizado pelo usuário e também do controle remoto que o usuário carrega.

1.2 Objetivos

O objetivo deste projeto é desenvolver um protótipo de um veículo individual de transporte de pequeno porte. O protótipo em questão possuirá uma estrutura baseada nos modelos de patins convencionais, com suas rodas acionadas por um conjunto de mecanismos e motores. O usuário efetuará o controle do veículo utilizando um controle remoto. O controle remoto consiste de um telefone móvel programado para realizar a interface entre o usuário e o controlador do veículo.

1.3 Motivação

Concepções de patins motorizados existem, porém o seu uso ainda está pouco consolidado no mercado, dessa forma, o potencial de crescimento do mercado desse tipo de veículo é muito grande. A disponibilidade de aquisição de um patins motorizado é limitada atualmente às regiões de fabricação e venda.

O desenvolvimento tecnológico e as novas formas de utilização dos materiais na concepção de motores e baterias compactas viabilizam a concepção de veículos individuais de pequeno porte. Essas tecnologias são empregadas na concepção de protótipos de patins motorizados.

Os patins motorizados apresentam um conceito simples de utilização da tecnologia atualmente disponível através da empregabilidade de elementos de alto desempenho com volume e peso reduzidos de forma a atender a funcionalidade do sistema. Os comandos, por sua vez, devem ser realizados através de uma interface simples para o usuário, de modo que não sejam necessários conhecimentos tecnológicos avançados do usuário para a sua utilização. Em resumo, é um equipamento simples, que utiliza componentes tecnológicos modernos, de fácil interação com o usuário, que reduz o esforço físico e o gasto de tempo para a locomoção em médias distâncias, e o seu custo deve ser viável para consumidores de diferentes categorias de poder aquisitivo.

1.4 Escopo

A concepção deste tipo de veículo de transporte individual de pequeno porte destina-se ao público jovem, que compreende desde adolescentes até adultos. O usuário não precisa ter conhecimento prévio sobre as tecnologias empregadas na concepção do produto, porém deve possuir conhecimento sobre a utilização de patins e também deve saber utilizar as funções de um aplicativo de celular. Para uma correta utilização do produto o usuário deve ganhar experiência com o equipamento, adquirida por meio do uso contínuo e de treino. Os patins motorizados efetuarão a locomoção em distâncias limitadas pela capacidade de carga da bateria. Os patins não podem ocupar um espaço grande, pois uma das preocupações é a sua capacidade de portabilidade para os lugares. O controle de velocidade dos patins será feito através de um celular que possibilitará que o usuário envie comandos para o microprocessador via conexão Bluetooth.

Em resumo, os patins serão transportáveis, efetuarão a locomoção entre pequenas distâncias, a velocidade será adaptada de modo correspondente à locomoção humana, sua utilização será restrita ao público jovem e também deverá ser acessível economicamente para as pessoas.

1.5 Metodologia

Para a realização do projeto de um patins motorizado primeiramente são analisadas soluções existentes no mercado e variantes de mesma função, como é o caso dos skates motorizados. A seguir são analisadas as disponibilidades tecnológicas para a concepção do produto, como a existência de motores e baterias de alto desempenho e tamanho reduzido e microprocessadores adaptados para realizar comunicação com o celular. Após estabelecer a solução, os materiais e os equipamentos empregados, o projeto segue para a fase de desenvolvimento dos sistemas mecânicos, eletrônicos e computacionais. Depois dessa fase é efetuada a construção do protótipo e a realização dos testes de funcionamento.

2 Desenvolvimento

Baseando-se no objetivo proposto, o projeto é dividido em diferentes etapas. Estas etapas são apresentadas na seguinte ordem: definição de critérios e requisitos operacionais do patins, análise dinâmica, determinação de componentes do sistema de acionamento, projeto elétrico, projeto mecânico, construção do protótipo e execução de testes para validação do modelo.

2.1 Análise de Requisitos

A determinação das necessidades do público alvo é avaliada com o objetivo de estabelecer os critérios operacionais do projeto. A utilização de patins motorizados destina-se ao transporte e entretenimento de jovens e adultos. A estimativa de massa do usuário é de 70kg, que é o valor médio de massa da população, com limite máximo de 100kg. Os usuários devem possuir conhecimento prévio referente à utilização de patins e aplicativos de celulares. A utilização do patins inclui locais com circulação de pedestres, portanto a velocidade do sistema pode ser controlada devido à questões de segurança. Os requisitos e critérios definidos para o projeto dos patins são os seguintes:

Necessidades do usuário:

- Locomoção em pequenas e médias distâncias;
- Redução do tempo de mobilidade;
- Redução do esforço físico para efetuar a mobilidade;
- Praticidade de transporte do equipamento.

Características do projeto:

- Interface de controle e acionamento amigáveis ao usuário;
- Valor comercial compatível com produtos similares;
- Velocidade de operação da mesma ordem de grandeza de um pedestre correndo;
- Seleção de materiais e projeto da estrutura mecânica deve considerar o peso das pessoas, assim como possíveis impactos;
- Aceleração limitada em faixas seguras e confortáveis para o usuário;
- Autonomia para deslocamentos da ordem de unidades de quilômetros.

Requisitos:

- Velocidade operacional mínima alcançável de 6 km/h;
- Aceleração máxima de $0,5 \text{ m/s}^2$;
- Massa máxima suportável de 100 kg;
- Mobilidade permitida com inclinação do piso de até 12,5% ($7,2^\circ$), que é a inclinação máxima de rampa de deficientes (SMPED, 2004);
- Autonomia de funcionamento de 30 minutos.

Interação com o usuário:

- Ligar e desligar o equipamento;
- Parear a comunicação Bluetooth entre patins e celular;
- Regular a velocidade do patins;
- Sistema de parada emergencial ativado pela queda do celular ou usuário;
- Efetuar desligamento emergencial através da queda de sinal do dispositivo.

2.2 Concepção do Sistema

Para efetuar o acionamento dos motores do patins através de comandos definidos pelo usuário é necessário definir um sistema integrado envolvendo elétrica, eletrônica e software. Esse sistema integrado apresenta os seguintes componentes: interface homem-máquina, sistema de recepção de sinais, sistema de controle de dados, circuito de alimentação dos sistemas e conjunto de atuadores. O esquema do sistema integrado de acionamento e controle do patins está representado na Figura 1.

O celular é o componente responsável pela interação do usuário com o patins por meio de uma interface, o usuário define a velocidade desejada e o telefone móvel envia esse comando para o controlador. A comunicação entre telefone móvel e o microcontrolador é realizada através de uma conexão sem fio definida pelo padrão Bluetooth. O

microcontrolador recebe os dados de velocidade do celular, interpreta-os e envia um sinal de controle para o acionador do motor. A bateria alimenta todos os componentes do sistema. O acionador transforma os sinais de baixa potência recebidos do microcontrolador em sinais de alta potência enviadas para o motor.

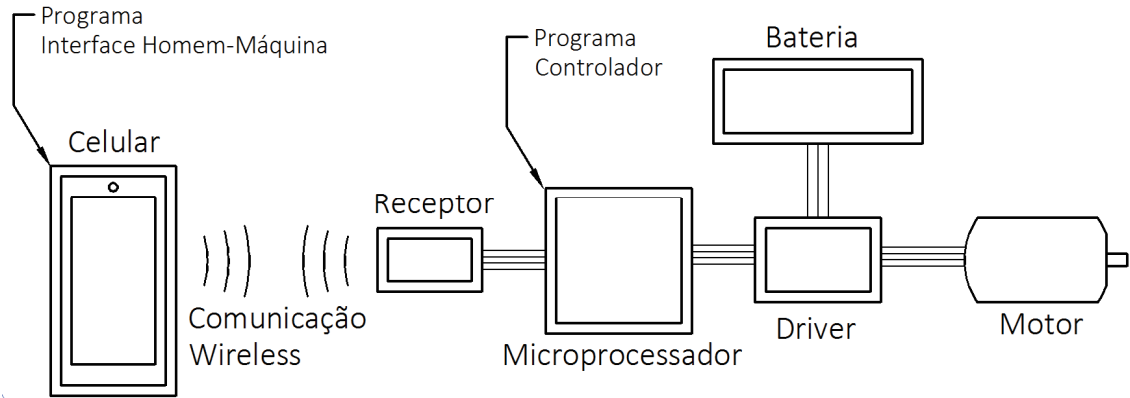


Figura 1 - Esquema geral do sistema elétrico e de controle.

Um esquema do sistema mecânico do patins está representado na Figura 2, ele é composto por um motor, um sistema de redução e rodas. O motor recebe um sinal do acionador e transmite movimento para as rodas via sistema de redução. O redutor é composto por polias e correia dentada e a sua relação de redução é n .

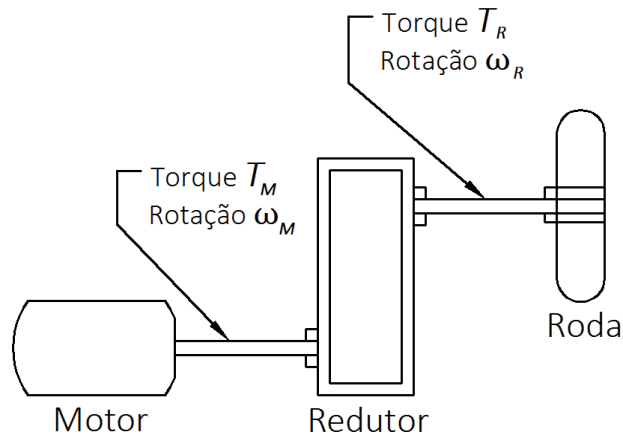


Figura 2 - Esquema geral do sistema mecânico.

A relação de torque e velocidade de rotação entre os eixos são afetados pelo sistema de redução. O torque fornecido pelo motor T_M é multiplicado pela redução n e fornecido ao eixo da roda como T_R , enquanto que a rotação do motor ω_M é dividida pela redução n e chega ao eixo da roda como ω_R .

$$T_R = T_M \cdot n \quad (1)$$

$$\omega_R = \omega_M / n \quad (2)$$

A equação 1 despreza os atritos do sistema de transmissão. A equação 2 considera o sincronismo entre eixos, ou seja, não há escorregamento no sistema de transmissão.

2.3 Modelagem

Foi desenvolvido um modelo matemático para analisar a dinâmica do patins. Esse modelo tem como objetivo definir valores de parâmetros relevantes do projeto para fornecer subsídios para escolha do motor, redução, bateria e acionador.

2.3.1 Hipóteses

As hipóteses implícitas no modelo teórico são as seguintes:

- Considera-se que o usuário é um corpo rígido. Os movimentos do corpo humano são complexos de se modelar e não são relevantes pois os movimentos do usuário forçam o sistema para uma situação de equilíbrio. O usuário executa movimentos de baixa amplitude mantendo sua postura aproximadamente constante. Assim questões como velocidades diferentes entre o par de patins e questões relacionadas à diferenças de aceleração nas diversas partes do corpo são desconsideradas.
- Assume-se que as rodas do patins estão sempre em contato com o solo. As rodas do patins, durante todo o seu funcionamento, devem estar em contato com o solo. Existem situações que acrescentam complexidade á modelagem como, por exemplo, o movimento na direção vertical envolvendo possíveis impactos e variações de carga aplicada no motor. Estas situações não são relevantes, pois estamos interessados em analisar a situação de regime.
- Assume-se que as rodas giram sem deslizar no solo, ou seja, a velocidade do ponto de contato entre roda e solo é nula. Observa-se que essa hipótese deve ser verificada na situação onde se exige a maior força de atrito comparando com a força máxima de atrito estático.

- Momento de inércia e massas das rodas e do conjunto motor-redutor são desprezíveis. A ordem de grandeza da inércia do sistema de atuadores é desprezível perto da ordem da grandeza de inércia do usuário.
- A resistência do ar é desprezível. A resistência do ar é proporcional ao quadrado da velocidade da pessoa andando no patins. Como a velocidade do usuário é pequena, então a resistência do ar pode ser desprezada.
- Atritos internos nos mancais de rolamento ou deslizamento são desprezíveis pois a ordem de grandeza da resistência do atrito interno nos mancais é muito inferior à ordem de grandeza de esforços inerciais ou gravitacionais.
- Possíveis rotações realizadas pelo usuário são desprezíveis. A situação de uso do patins requer que o usuário controle minimamente os patins para que sua postura permaneça constante. Isso é feito pela distribuição das cargas no pé do usuário e pelo controle de distancia entre os dois pés usando a musculatura.
- Existência de atrito de rolamento entre as rodas e o piso. A resistência do movimento do patins será considerada e é proporcional a força normal e a um coeficiente de rolamento.

2.3.2 Modelo Cinemático

A Figura 3 apresenta uma situação genérica de utilização de um patins motorizado, com o usuário subindo uma rampa de inclinação α . Cada patins possui um conjunto de rodas livres e outro de rodas motorizadas. As rodas, com dimensão de raio R , giram com velocidade ω_R . Considerando o usuário como um corpo rígido sem movimento de rotação, é possível afirmar que qualquer ponto da pessoa ou do patins com exceção da roda terá o mesmo vetor velocidade \mathbf{v} , assim como o mesmo vetor aceleração $\dot{\mathbf{v}}$. As rodas são corpos rígidos, que possuem rotação ω_R . A velocidade no centro da roda é igual ao do usuário. Com a hipótese do não escorregamento entre a roda e o solo, como o solo tem velocidade nula, a roda tem esse ponto com velocidade nula também.

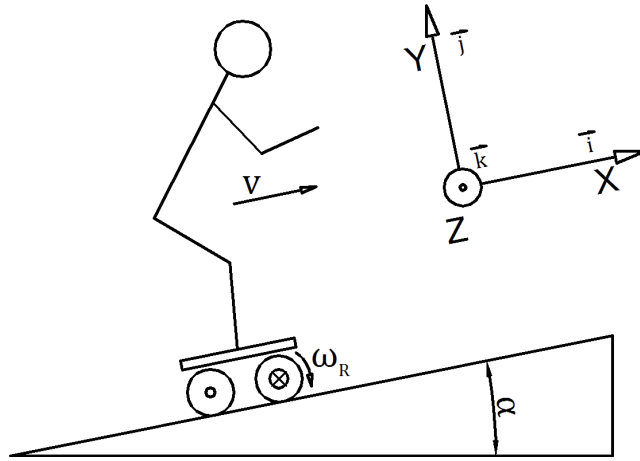


Figura 3 - Modelo cinemático.

A equação 3 apresenta a relação cinemática entre a velocidade do usuário e a velocidade de rotação da roda para o caso de não escorregamento.

$$v = \omega_R R \quad (3)$$

2.3.3 Diagrama de Corpo Livre

O modelo proposto sofre as seguintes forças: a força peso P , o torque fornecido na roda T_R , e as forças de contato entre a roda e o chão. As forças de contato são divididas em normal e de atrito, então existe a força normal na roda livre N_L e na roda motorizada N_M , assim como a força de atrito na roda livre F_{at_L} e na roda motorizada F_{at_M} . Essas são apresentadas na Figura 4, que considera a situação do motor estar acelerando o usuário na direção do eixo X.

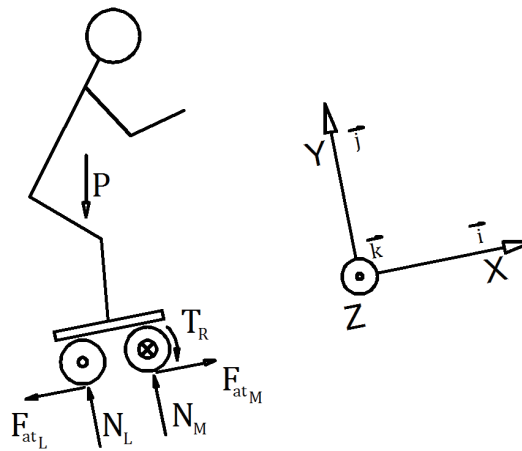


Figura 4 - Diagrama de corpo livre.

Aplicando o teorema do movimento do baricentro na direção do eixo X, ou seja, a resultante das forças externas deve ser igual a inércia do sistema vezes a aceleração, tem-se para uma pessoa de massa M a seguinte equação:

$$M\dot{v} = F_{at_M} - F_{at_L} - P \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

Aplicando o teorema do movimento do baricentro na direção Y, usando a hipótese de não deslocamento na direção Y, ou seja, aceleração na direção Y é nula. Obtém-se a equação 5.

$$0 = N_M + N_L - P \cos \alpha \quad (5)$$

Observando que a soma das forças de atrito atuantes nas rodas motorizadas e livres é a composição do efeito do atrito de rolamento e do esforço gerado pelo torque da roda. A força causada pelo torque é a geradora do movimento, enquanto os atritos de rolamentos são dissipadores de energia.

$$F_{at_M} - F_{at_L} = -\mu_r (N_M + N_L) + \frac{T_R}{R} \quad (6)$$

Reescrevendo a equação 5, utilizando que o peso é a multiplicação da massa pela gravidade como está representado pela equação 7, chegamos na equação 8. E substituindo essa na equação 6, para se retirar os termos de normais, obtém-se a equação 9.

$$P = Mg \quad (7)$$

$$Mg \cos \alpha = N_M + N_L \quad (8)$$

$$F_{at_M} - F_{at_L} = -\mu_r Mg \cdot \cos \alpha + \frac{T_R}{R} \quad (9)$$

Aplicando a equação 9 na equação 4, com o objetivo de remover os termos de atrito, e utilizando a equação 1 para aparecer o termo de torque do motor, obtemos a equação 10.

$$M\dot{v} = +\frac{T_M n}{R} - \mu_r Mg \cos \alpha - Mg \sin \alpha \quad (10)$$

A equação 10 descreve que a aceleração do sistema depende do torque do motor e tem que superar os esforços de atrito de rolamento e esforços gravitacionais. Contudo o equacionamento ainda deve incluir os efeitos do sistema elétrico.

2.3.4 Modelo do Motor

A modelagem do motor relaciona parâmetros mecânicos e eletromagnéticos do sistema. O modelo do motor de corrente contínua é apresentado na Figura 5. Os elementos do circuito são: a resistência interna R_{int} , a indutância da bobina L , a tensão induzida pela rotação do motor E , a tensão de alimentação do motor V e a corrente do circuito I . Este modelo é apresentado na equação 11.

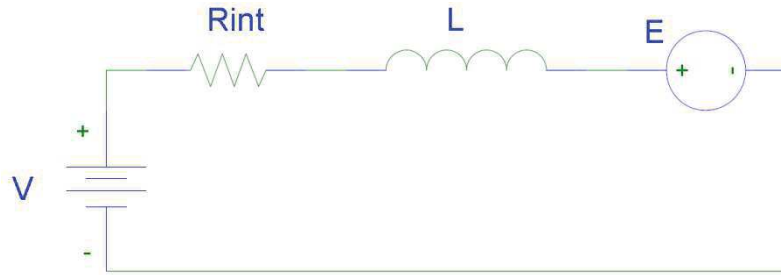


Figura 5 - Modelo elétrico do motor de corrente contínua.

A tensão induzida no motor é diretamente proporcional à velocidade angular do motor, através da constante K_v , apresentado na equação 12. Enquanto o torque é proporcional a corrente no circuito, através da constante K_t apresentado na equação 13.

$$V = R_{int}I + L \frac{dI}{dt} + E \quad (11)$$

$$\omega_M = K_v E \quad (12)$$

$$T_M = K_t I \quad (13)$$

Considerando que o sistema elétrico esteja em condição de equilíbrio, o termo que acompanha a indutância se torna nulo pois a resistência de um motor é pequena e a queda de tensão na resistência é desprezível. Assumindo que a energia elétrica seja convertida completamente em energia mecânica e desprezando-se as perdas mecânicas, conclui-se que os valores de K_v e K_t são inversos. Reescrevendo as equações acima com essas considerações, obtemos as equações 14 e 15.

$$\omega_M = K_v V \quad (14)$$

$$T_M = \frac{1}{K_v} I \quad (15)$$

O modelo elétrico do motor é representado pelas equações acima, observando que a rotação do motor depende apenas da tensão de alimentação e o torque depende apenas da corrente do sistema.

2.3.5 Modelo da Bateria

A bateria é o componente responsável por fornecer energia para o sistema de acionamento, seus parâmetros relevantes são a tensão fornecida por ela ao motor V e a sua carga C . A seleção da tensão V da bateria depende do motor selecionado e da rotação desejada. A relação entre a tensão na bateria, a velocidade do usuário e a rotação do motor é dada pela equação 16.

$$V = \frac{n}{K_v} \omega_R = \frac{n}{K_v} \frac{v}{R} \quad (16)$$

A carga da bateria C deve ser selecionada pelo tempo de autonomia t , a corrente elétrica no circuito do motor, o torque desejado para o funcionamento do patins e a tensão da mesma, conforme apresentado na equação 17.

$$V C = \omega_R T_R t \quad (17)$$

Essas equações calculam os valores mínimos de tensão e carga que a bateria deve possuir.

2.3.6 Cálculo de Torque e Velocidade de Rotação

As equações desenvolvidas até agora permitem o cálculo do torque e da rotação no eixo da roda. Estes valores são utilizados para determinar as características operacionais do motor juntamente com o redutor de velocidade. Dentre as situações importantes a serem analisadas temos: o regime transitório e o regime permanente em planos com diferentes inclinações. Isso será feito utilizando-se a equação 3 para cálculo de rotação e a equação 10 para o cálculo do torque através dos valores especificados nos critérios operacionais.

Os modelos de rodas de patins têm diâmetros que variam entre 40mm e 110mm, sendo que os mais comuns possuem 70mm (modelo intermediário de roda selecionado para o protótipo).

Considerando-se que as rodas de patins são feitas comumente de poliuretano, e o contato será feita com o asfalto, concreto ou piso, o valor do atrito de rolamento é estimado em

$\mu_r = 0,005$ e o valor de atrito estático é estimado em $\mu_s = 0,2$ para esses pares de materiais. Esses valores foram gerados através da avaliação de tabelas de coeficientes de atritos que incluíam pares de materiais como borracha e concreto.

Utilizando-se a equação 3, com o critério operacional de velocidade de $v = 6 \text{ Km/h}$, e utilizando-se a roda de raio $R = 35 \text{ mm}$, obtém-se a rotação do motor em função da redução:

$$\frac{\omega_M}{n} = \omega_R = 455 \text{ rpm} \quad (18)$$

No regime transitório com movimento no plano inclinado, substituindo os valores $R = 35 \text{ mm}$, $M = 100 \text{ Kg}$, $\alpha = 7.2^\circ$, $a_{\max} = 0.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, $\mu_r = 0,005$ na equação 10, obtém-se o torque do motor em função da redução.

$$T_M n = T_R = 6,22 \text{ N.m} \quad (19)$$

No regime permanente com movimento no plano inclinado, substituindo os valores $R = 35 \text{ mm}$, $M = 100 \text{ Kg}$, $\alpha = 7.2^\circ$, $a_{\max} = 0$, $\mu_r = 0,005$ na equação 10, obtém-se o torque do motor em função da redução.

$$T_M n = T_R = 4,47 \text{ N.m} \quad (20)$$

No regime permanente com movimento no plano horizontal, substituindo os valores $R = 35 \text{ mm}$, $M = 100 \text{ Kg}$, $\alpha = 0^\circ$, $a_{\max} = 0$, $\mu_r = 0,005$ na equação 10, obtém-se o torque do motor em função da redução.

$$T_M n = T_R = 0,17 \text{ N.m} \quad (21)$$

Para avaliar a hipótese de não escorregamento utiliza-se o caso de maior requisito da força de atrito, que é o de regime transitório no plano inclinado. Essa validação é feita comparando-se a força total de atrito entre a roda e o solo com a força de atrito estático máximo admissível. Para o calculo é considerado que o usuário incline seu corpo e concentre o seu peso nas rodas motorizadas. Assim é avaliado se o limite de atrito é atingido, calculado como a normal vezes o coeficiente de atrito estático, apresentado na equação 22.

$$\frac{T_M n}{R} = \frac{T_R}{R} \leq \mu_s M g \cos \alpha \quad (22)$$

Substituindo-se os valores $R = 35 \text{ mm}$, $M = 100 \text{ Kg}$, $\alpha = 7.2^\circ$, $\mu_s = 0,02$, $T_R = 6,22 \text{ N.m}$ na equação 22, obtém-se a comparação de valores na equação 23, que mostra a inexistência de escorregamento.

$$\frac{T_R}{R} = 178 \text{ N} \leq 195 \text{ N} \quad (23)$$

Através da modelagem mecânica são obtidos os requisitos operacionais do motor que são: torque e velocidade de rotação. Estes requisitos operacionais são utilizados na seleção do motor.

2.4 Seleção de Motores e Redutores

Existem inúmeras possibilidades de escolha de motor e redutor que atendem aos requisitos operacionais estabelecidos. Assim, deve-se selecionar a melhor solução. No projeto de um patins motorizado existem algumas características referentes à cada tipo de solução que devem ser analisadas cuidadosamente para efetuar a melhor escolha do sistema de motor e redutor, tais como: espaço máximo interno ocupado pelo sistema, desempenho operacional, viabilidade de montagem e execução operacional do sistema.

O espaço interno disponível para alocação dos componentes em um patins é menor em relação aos outros veículos individuais de médio e grande porte e por isso componentes que ocupem pouco espaço relativo ao tamanho total da estrutura interna do patins são priorizados na análise. As dimensões dos componentes devem ser analisadas levando-se em conta o funcionamento geral da estrutura. As características operacionais do motor juntamente com seu redutor devem atender aos requisitos mecânicos de torque máximo e rotação mínima estabelecidas nas equações 18 e 19. As características do motor de um modo geral se resumem em: dimensões máximas compatíveis com o espaço estrutural interno, torque e rotação compatíveis com os requisitos mínimos e viabilidade operacional e construtiva.

A utilização de critérios quantitativos é uma forma de melhorar a análise e refinar as soluções, portanto foram estabelecidos critérios quantitativos de espaço máximo ocupado, o que por sua vez introduziu novos parâmetros para o projeto, tais como:

Requisitos dimensionais:

- Limite máximo de comprimento do conjunto motor-redutor: 150 mm;
- Limite máximo de largura e altura do conjunto motor-redutor: 100 mm.

Requisito operacionais:

- Torque máximo do conjunto motor-redutor: 6 N.m;
- Rotação mínima do conjunto motor-redutor: 460 rpm;
- Corrente máxima do motor: 100A.

Outros requisitos:

- Disponibilidade do conjunto motor-redutor no mercado;
- Massa total do conjunto motor-redutor;
- Preço do conjunto motor-redutor;
- Viabilidade de execução construtiva do conjunto motor-redutor.

Na Tabela 2 são listadas as soluções que melhor atendem aos requisitos propostos anteriormente. As soluções em questão apresentam diferentes características operacionais e construtivas. Todas as soluções utilizam um conjunto motor-redutor.

Tabela 2 - Listagem de soluções avaliadas.

Nº da solução	Solução
1	Banebots P60 Gearbox 1:26 + Banebots RS-540 Motor - 12 V
2	12V, 780RPM 2400 oz-in Planetary Gearmotor
3	Turnigy Aerodrive SK3 - 6374-192kv Brushless Outrunner Motor
4	Turnigy Aerodrive SK3 - 5055-280kv Brushless Outrunner Motor
5	Turnigy Aerodrive SK3 - 4250-500kv Brushless Outrunner Motor

2.4.1 Solução 1 - Banebots P60 Gearbox com Motor RS 540

O redutor escolhido é do tipo planetário, que apresenta relação de redução e dimensão mais apropriados para o projeto. O redutor escolhido é o modelo P60 da BaneBots (Figura 6), que apresenta menor dimensão em relação aos outros modelos pesquisados e suas características operacionais são compatíveis com os requisitos de projeto.



Figura 6 - Banebots P60.
Fonte: RobotShop (2015a)

O redutor P60 da Banebots é compatível com quatro tipos de motores, porém o que melhor atende aos requisitos propostos pelo projeto é o motor RS540 também da Banebots (Figura 7). Na Tabela 3 estão apresentadas as características do motor e os requisitos operacionais para o conjunto motor-redutor.



Figura 7 - Motor RS540.
Fonte: RobotShop (2015b)

Tabela 3 - Características operacionais do motor RS540 e os requisitos de projeto.

Característica	Motor RS540	Requisitos Operacionais
Torque Máximo (N.m)	0,2788	6,0000
Rotação Máxima(rpm)	16800	460

Por meio dos dados apresentados na Tabela 3 observa-se que as características operacionais do motor não atingem os requisitos de operação de torque determinado pelo projeto, sendo assim necessário um redutor de modo a amplificar o torque e assim atingir o valor estabelecido. A relação de redução do redutor é calculada utilizando-se a equação 1.

$$n = \frac{T_R}{T_M} = \frac{6,0000}{0,2788} \cong 22 \quad (24)$$

A redução a ser utilizada deve ter uma relação de 1:22. Após calcular a redução necessária devemos verificar se a implementação dessa redução não afetará o requisito operacional de rotação determinado pelo projeto. A equação a seguir calcula a rotação máxima das rodas usando este conjunto motor-redutor.

$$\omega_R = \frac{\omega_M}{n} = \frac{16800}{22} \approx 764 \text{ rpm} \quad (25)$$

Portanto observa-se que a utilização do redutor possibilita que o sistema atinja o torque máximo necessário e também não impossibilita o sistema de atingir a rotação mínima necessária. O fabricante não fornece um redutor que efetue exatamente a redução de 1:22, então ao verificar um redutor com valor de redução próxima a 1:22 chegou-se em um redutor BaneBots P60 com redução de 1:26 e assim deve-se novamente efetuar os cálculos operacionais do motor utilizando a redução de 1:26:

$$T_R = T_M \cdot n = 0,2788 \cdot 26 \approx 7,25 \text{ N.m} \quad (26)$$

$$\omega_R = \frac{\omega_M}{n} = 16000 * \frac{1}{26} \approx 646 \text{ rpm} \quad (27)$$

Observa-se que o motor acoplado com um redução de 1:26 atinge os requisitos operacionais de projeto. Para a transmissão de movimento para o eixo da roda optou-se pela utilização de um sistema de engrenagens cônicas acopladas no eixo do redutor e da roda de modo que o motor permaneça paralelo ao pé.

Tabela 4 - Características da solução.

Banebots P60 Gearbox com motor RS 540	
Rotação máxima	646 rpm
Torque máximo	7,25 N.m
Tensão Operacional Máxima	12 V
Corrente Máxima	42 A
Comprimento Máximo	99 mm
Largura/Altura Máxima	38,5 mm
Peso	0,38 Kg
Preço Total	R\$ 182,25
Solução Construtiva	1 Redutor planetário e 1 Sistema de engrenagens cônicas

2.4.2 Solução 2 - Motor AndyMark 9015 com Redutor Planetário

Outra alternativa proposta como solução para o projeto utiliza motoredutores, ou seja, motores com redutor já acoplado. A ideia dessa solução consiste em utilizar os valores finais de torque, rotação e dimensões disponibilizados pelo fornecedor. A solução em questão consiste em utilizar um motor AndyMark 9015 com um redutor planetário. As características fornecidas pelo fornecedor estão listadas nas Tabelas 5 e 6:



Figura 8 - Motor AndyMark 9015 com redutor planetário.
Fonte: RobotShop (2015c)

Tabela 5 - Características operacionais do motor AndyMark com redutor e os requisitos de projeto.

Característica	Motor+Redutor	Requisitos Operacionais
Torque Máximo (N.m)	16	6
Rotação Máxima (rpm)	780	460

Pelos dados apresentados na Tabela 5 observa-se que o motor da AndyMark 9015 com o redutor planetário acoplado atinge os requisitos operacionais de projeto. Para a transmissão de movimento para o eixo optou-se pela utilização de um sistema de engrenagens cônicas acopladas no eixo do redutor e da roda de modo que o motor permaneça paralelo ao pé.

Tabela 6 - Características da solução.

Motor AndyMark 9015 com redutor planetário	
Rotação máxima	780 rpm
Torque máximo	16 N.m
Tensão Operacional Máxima	12 V
Corrente Máxima	64 A
Comprimento Máximo	140 mm
Largura/Altura Máxima	46 mm
Peso	0,63 kg
Preço Total	R\$ 207,00
Solução Construtiva	1 Redutor planetário e 1 Sistema de engrenagens cônicas

2.4.3 Solução 3 - Turnigy Aerodrive SK3 - 6374-192kv Brushless Outrunner Motor

Os motores de aeromodelo apresentam-se como uma boa alternativa, tendo em vista a relação entre potência e tamanho do motor. Os motores de aeromodelos são muito potentes e também são pequeno se comparado com outros motores da mesma categoria. Os motores de aeromodelos por possuírem tais características são frequentemente utilizados em projetos de skates motorizados, que também possuem o mesmo objetivo de efetuar a locomoção de pessoas entre pequenas e médias distâncias.

Como os dados de rotação mínima e torque máximo não são fornecidos pelo fabricante, antes de iniciar a análise de diferentes motores de aeromodelos efetuamos cálculos de torque e rotação máxima para verificar se as soluções apresentadas atingem os requisitos de projeto para serem validadas como solução.

Esta solução consiste em utilizar um motor Turnigy Aerodrive SK3 - 6374-192kv Brushless Outrunner (Figura 9), com as características apresentadas na Tabela 7, acoplado em um conjunto de polias que constituem um sistema de redução.



Figura 9 - Turnigy Aerodrive SK3 - 6374- 192kv.
Fonte: Hobbyking (2015a)

Tabela 7 - Características do motor.

Turnigy Aerodrive SK3 - 6374-192kv Brushless Outrunner Motor	
Rotação máxima	8448 rpm
Torque máximo	3,98 N.m
Tensão Operacional Máxima	44 V
Corrente Máxima	80 A
Comprimento Máximo	113 mm
Largura/Altura Máxima	59 mm
Peso	0,858 Kg
Preço Total	R\$ 276,87
Solução Construtiva	1 Sistema de polias

Utilizando os dados de constante de velocidade, tensão máxima e corrente máxima do motor fornecidos pelo fabricante, através das equações 14 e 15, calculam-se a rotação e torque máximos:

$$\omega_M = 192 \cdot 44 = 8448 \text{ rpm} \quad (28)$$

$$T_M \approx \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot 192} \cdot 80 = 3,98 \text{ N.m} \quad (29)$$

O torque máximo do motor não atende ao requisito operacional de torque e portanto deve-se utilizar um sistema de redutores para obter o torque necessário. As equações a seguir calculam a relação de redução do sistema de redutores e o novo valor de rotação máxima após a redução.

$$n = \frac{6,00}{3,98} \cong 1,5 \quad (30)$$

$$\omega_R = \frac{8448}{1,5} = 5632 \text{ rpm} \quad (31)$$

Portanto para utilizar este motor de modo a atingir os requisitos operacionais de projeto deve-se utilizar um sistema de redução com relação de pelo menos 1:2.

2.4.4 Solução 4 - Turnigy Aerodrive SK3 - 5055-280kv Brushless Outrunner Motor

Esta solução consiste em utilizar um motor Turnigy Aerodrive SK3 - 5055-280kv Brushless Outrunner Motor (Figura 10), com as características apresentadas na Tabela 8, acoplado a um conjunto de polias que constituem um sistema de redução.



Figura 10 - Turnigy Aerodrive SK3 - 5055 - 280kv.
Fonte: Hobbyking (2015b)

Tabela 8 - Características do motor.

Turnigy Aerodrive SK3 - 5055-280kv Brushless Outrunner Motor	
Rotação máxima	10360 rpm
Torque máximo	2,05 N.m
Tensão Operacional Máxima	37 V
Corrente Máxima	60 A
Comprimento Máximo	81 mm
Largura/Altura Máxima	49 mm
Peso	0,369 Kg
Preço Total	R\$ 147,69
Solução Construtiva	1 Sistema de polias

Utilizando os dados de constante de velocidade, tensão máxima e corrente máxima do motor fornecidos pelo fabricante, através das equações 14 e 15, calculam-se a rotação e torque máximos:

$$\omega_M = 280 \cdot 37 = 10360 \text{ rpm} \quad (32)$$

$$T_M \approx \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot 280} \cdot 60 = 2,05 \text{ N.m} \quad (33)$$

O torque máximo do motor não atende ao requisito operacional de torque e portanto deve-se utilizar um sistema de redutores para obter o torque necessário. As equações a seguir calculam a relação de redução do sistema de redutores e o novo valor de rotação máxima após a redução.

$$n = \frac{6,00}{2,05} \cong 3 \quad (34)$$

$$\omega_R = \frac{10360}{3} = 3453 \text{ rpm} \quad (35)$$

Portanto para utilizar este motor de modo a atingir os requisitos operacionais de projeto deve-se utilizar um sistema de redução com relação de 1:3.

2.4.5 Solução 5 - Turnigy Aerodrive SK3 - 4250-500kv Brushless Outrunner Motor

Esta solução consiste em utilizar dois motores Turnigy Aerodrive SK3 - 4250-500kv Brushless Outrunner Motor (Figura 11), com as características apresentadas na Tabela 9, ambos acoplados em um conjunto de polias que constituem um sistema de redução.



Figura 11 - Turnigy Aerodrive SK3 - 4250 - 500kv.
Fonte: Hobbyking (2015c)

Tabela 9 - Características do motor.

Turnigy Aerodrive SK3 - 4250-500kv Brushless Outrunner Motor	
Rotação máxima (rpm)	9500
Torque máximo (N.m)	1,09
Tensão Operacional Máxima (V)	19
Corrente Máxima (A)	57
Comprimento Máximo (mm)	80
Largura/Altura Máxima (mm)	42
Peso (kg)	0,269
Preço Total (R\$)	109,20
Solução Construtiva	2 Sistemas de polias

Utilizando os dados de constante de velocidade, tensão máxima e corrente máxima do motor fornecidos pelo fabricante, através das equações 14 e 15, calcula-se a rotação e torque máximo:

$$\omega_M = 500 \cdot 19 = 9500 \text{ rpm} \quad (36)$$

$$T_M \approx \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot 500} \cdot 19 = 1,09 \text{ N.m} \quad (37)$$

O torque máximo do motor não atende ao requisito operacional de torque e portanto deve-se utilizar um sistema de redutores para obter o torque necessário. As equações a seguir calculam a relação de redução do sistema de redutores e o novo valor de rotação máxima após a redução.

$$n = \frac{6,00}{1,09} \cong 6 \quad (38)$$

$$\omega_R = \frac{9500}{6} = 1583 \text{ rpm} \quad (39)$$

Portanto para utilizar este motor de modo a atingir os requisitos operacionais de projeto deve-se utilizar dois motores com sistema de redução com relação de 1:3 em cada motor.

2.4.6 Escolha do Motor e Redutor

Os requisitos foram escolhidos e divididos em diferentes categorias baseadas na lógica de funcionamento do sistema conforme apresentado na Tabela 10. Os requisitos operacionais tais como rotação e torque permitem que o sistema opere segundo os critérios estabelecidos. O espaço ocupado para instalação dos componentes também é um item crítico pois o sistema possui limitação estabelecida pela dimensão aproximada do pé do usuário.

Tabela 10 - Divisões e subdivisões de requisitos.

Requisitos	Sub-requisitos
Operacional	Rotação Mínima (rpm) Torque Máximo (N.m)
Bateria	Tensão Operacional Máxima (V) Corrente Máxima (A)
Espaço	Comprimento Máximo (mm) Largura e Altura Máxima (mm)
Diferenciais	Peso (g) Preço Total (R\$) Solução Construtiva

Para escolher o melhor conjunto de motor-redutor será utilizada uma matriz de decisão onde todas as soluções são avaliadas por meio de um sistema de atribuição de notas referente à cada requisito, em seguida as notas são ponderadas, somadas e finalmente escolhe-se a solução com a maior nota. As notas variam de 1 a 5, sendo que 5 é a nota máxima atribuída a um critério. Cada nota é definida conforme descrita na Tabela 11:

Tabela 11 - Definição das notas.

Nota	Significado
5	A solução atinge 100% do requisito
4	A solução atinge 80% do requisito
3	A solução atinge 60% do requisito
2	A solução atinge 40% do requisito
1	A solução atinge 20% do requisito

Os requisitos operacionais referem-se às questões relacionadas com o sistema de acionamento do patins, ou seja, estão ligadas diretamente à parte mecânica dos motores e suas características como por exemplo o torque máximo e a velocidade de rotação mínima.

A avaliação do sub-requisito de rotação mínima verifica se o valor de rotação máxima de cada solução ultrapassa ou não o valor de rotação mínimo estabelecido como requisito de projeto.

A avaliação do sub-requisito de torque máximo verifica se o valor de torque máximo da solução atinge ou ultrapassa o valor máximo estabelecido como requisito de projeto. Os requisitos correspondentes à bateria estão relacionados com o tempo máximo de funcionamento do patins.

A avaliação do sub-requisito de Tensão operacional máxima verifica se o valor de tensão máxima do motor se aproxima ou não de um valor aceitável estabelecido.

A avaliação do sub-requisito de Corrente máxima verifica se o valor de corrente máxima do motor se aproxima ou não de um valor aceitável estabelecido pela relação de tensão e tamanho da bateria.

Os requisitos de espaço referem-se às dimensões totais ocupadas pelo sistema de motor e redutor e o seu impacto no dimensionamento do projeto

A avaliação do sub-requisito de Comprimento máximo verifica o comprimento máximo da solução em relação ao limite de comprimento máximo estabelecido pelo projeto.

A avaliação do sub-requisito de Largura e Altura máxima verifica o valor de largura e altura máxima da solução em relação ao limite máximo estabelecido pelo projeto.

Os requisitos diferenciais estão ligados com outros tipos de requisitos que não estão relacionados diretamente com algum valor determinado pelo projeto mas sim com elementos que muitas vezes atuam como elementos críticos e por isso devem ser levados em conta.

Avaliação do sub-requisito de Peso está relacionada com o peso total da solução e o impacto causado no sistema. A ordem de grandeza do peso da solução é menor que a ordem de grandeza da massa do usuário e portanto a massa da solução não influencia na massa total do sistema e por isso é atribuído um ponderador baixo.

Avaliação do sub-requisito de Preço total verifica o preço total da solução, este critério possui um ponderador baixo pois todas as soluções apresentam valores acessíveis de mercado para a sua aquisição e por isso não é um fator que impacta diretamente no projeto.

O sub-requisito de Solução Construtiva é um dos fatores mais críticos no projeto depois dos fatores limitantes de torque e rotação pois ele afeta diretamente na complexidade de construção do protótipo e sua viabilidade. Soluções mais simples aumentam a chance de sucesso na construção de um protótipo, em contrapartida, soluções mais complexas dificultam a construção, concepção e validação do protótipo.

Após definir cada sub-requisito foram atribuídos diferentes valores de ponderador que representa o nível de relevância de cada característica no projeto (Tabela 12). Os ponderadores variam de 1 a 9, sendo 9 o valor mais alto.

Tabela 12 - Notas atribuídas para os diversos requisitos de cada solução.

Critérios	Ponderador (1 - 9)	Solução				
		1	2	3	4	5
Rotação Máxima (rpm)	8	5	5	5	5	5
Torque Máximo (N.m)	9	5	5	5	5	5
Tensão Operacional Máxima (V)	3	5	5	3	4	5
Corrente Máxima (A)	4	5	4	3	4	4
Comprimento Máximo (mm)	6	4	3	4	5	5
Largura/Altura Máxima (mm)	5	5	4	3	4	4
Peso (g)	2	4	4	2	3	3
Preço Total (R\$)	1	3	2	1	2	1
Solução Construtiva	7	2	2	4	4	2

Torque e rotação são requisitos fundamentais para o funcionamento adequado do patins pois estão relacionados diretamente com a proposta do projeto de efetuar a locomoção do usuário e por isso recebem os valores mais altos de ponderação. A solução construtiva está relacionada diretamente com a viabilidade de implementação da solução, ela não é mais crítica que os requisitos operacionais mas é mais crítica que os outros critérios e por isso recebe um dos valores mais altos de ponderação. Comprimento, altura e largura também estão relacionados com a viabilidade de implementação da solução, porém elas não afetam diretamente na complexidade, pois as soluções possuem dimensões comparativamente parecidas e por isso recebem valores intermediários de ponderação. Tensão e corrente máxima estão relacionadas com a utilização da bateria e a disponibilidade dela no mercado. As baterias de todas as soluções estão disponíveis no mercado e por isso este requisito interfere menos no projeto e recebe menor valor intermediário de ponderação. O peso e o

preço não estão ligados diretamente com o funcionamento do sistema de modo que o peso total do conjunto é desprezível se comparado com o peso do usuário e as soluções apresentam valores acessíveis de compra e por isso recebem os menores valores de ponderação.

Depois de classificar e avaliar as soluções por meio da análise de requisitos foram estabelecidas notas ponderadas para cada solução, as quais foram somadas e apresentadas na Tabela 13 e assim foi possível a classificação de cada solução frente às notas obtidas.

Tabela 13 - Nota ponderada para cada solução.

Crítérios	Solução				
	1	2	3	4	5
Rotação Máxima (rpm)	40	40	40	40	40
Torque Máximo (N.m)	45	45	45	45	45
Tensão Operacional Máxima (V)	15	15	9	12	15
Corrente Máxima (A)	20	16	12	16	16
Comprimento Máximo (mm)	24	18	24	30	30
Largura/Altura Máxima (mm)	25	20	15	20	20
Peso (g)	8	8	4	6	6
Preço Total (R\$)	3	2	1	2	1
Solução Construtiva	14	14	28	28	14
Total	195	180	181	203	192

Depois de atribuir as notas, as soluções foram classificadas e dispostas em um sequencia decrescentes de valores finais apresentadas na Tabela 14 para que assim fosse escolhida a melhor solução, ou seja, a solução com a maior nota ponderada.

Tabela 14 - Classificação de soluções segundo a soma das notas ponderadas de cada requisito.

Classificação	Nota ponderada	Solução
1	203	4
2	195	1
3	192	5
4	181	3
5	180	2

Por meio da utilização da matriz de decisão chegou-se à conclusão de que a solução que melhor atende às necessidades do projeto é a solução 4, ou seja, a utilização do motor Turnigy Aerodrive SK3 - 5055-280kv Brushless Outrunner em conjunto com um sistema de redução com relação de 1:3 para efetuar a transmissão de movimento para o eixo das rodas do patins.

2.5 Seleção da Transmissão

A escolha da transmissão que melhor atende aos requisitos é fornecida pelo motor e também pela relação de redução que será utilizada no sistema. O sistema de redução e transmissão de movimento será composto por duas polias dentadas, uma maior e uma menor, conectadas por uma correia sincronizadora (Figura 12). O motivo de se utilizar polias e correias sincronizadoras para o projeto se deve ao fato de que esses componentes são adequados em aplicações que exigem torques elevados sem a dependência exclusiva do atrito entre polia e correia para efetuar a transmissão de movimento.



Figura 12 - Polias dentadas e correias sincronizadoras.
Fonte: Correias Schneider (2015)

Para determinar o melhor modelo de polia que será utilizada foram estabelecidos alguns parâmetros, baseando-se na consulta de catálogos de fornecedores:

- Diâmetro do furo da polia;
- Modelo da polia;
- Passo da polia;
- Largura da correia;
- Número de dentes da polia.

O diâmetro do furo da polia menor depende do diâmetro do eixo do motor (6mm) e o diâmetro do furo da polia maior depende do diâmetro do eixo das rodas do patins. O modelo da polia é o HTD que é comumente empregado em sistemas de redução de skates motorizados. O passo dos modelos de polias HTD variam de 3mm a 14mm, o passo que

apresenta a melhor relação de diâmetro primitivo e número de dentes é o de 3mm, que será utilizado em ambas as polias. A largura da correia para ambas as polias é padronizada em 9mm. O número de dentes da polia menor e da maior devem ter relação de 1:3 e por isso será escolhida uma de 18 dentes e uma de 56 dentes. Os dados das polias são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Especificações das polias.

Especificação	Polia menor	Polia maior
Diâmetro do furo (mm)	6	8 a 26
Modelo	HTD	HTD
Passo (mm)	3	3
Largura da correia (mm)	9	9
Número de dentes	18	56
Diâmetro (mm)	17,2	53,5

Para especificar a correia deve-se estabelecer os seguintes parâmetros:

- Largura da correia;
- Passo da correia;
- Modelo da correia;
- Comprimento da correia.

A correia deve ser compatível com as polias e portanto a largura, o passo e o modelo devem ser iguais aos das polias. O comprimento da correia é determinado pelo diâmetro primitivo e pela distância entre os centros das polias, porém a distância entre centros depende do projeto mecânico estrutural completo. Os dados da correia são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Especificação da correia.

Especificação	Correia
Largura (mm)	9
Passo (mm)	3
Modelo	HTD

2.6 Seleção das Rodas

A seleção da roda foi baseada nos modelos de patins e skate, que tem como características relevantes o diâmetro externo e o material de fabricação. O diâmetro da roda relaciona-se com a velocidade do patins, ou seja, quanto maior a velocidade maior deverá ser o diâmetro da roda. As rodas possuem diâmetros que variam entre 40 e 100mm. O poliuretano é o material mais utilizado na fabricação das rodas de patins e skate, e a sua dureza depende do processo de fabricação. A dureza do material da roda se relaciona com a capacidade de absorver impactos e a sua durabilidade .



Figura 13 - Roda OXELO Diâmetro 70mm.

A seleção da roda considerou um modelo intermediário de roda, por causa do critério de velocidade proposto. Assim foi selecionado o modelo da OXELO de 70mm de diâmetro mostrado na Figura 13 .

A velocidade de translação máxima alcançada pelo patins com o conjunto motor-redutor é dado pela equação 40, onde ω_{max} é a velocidade máxima de rotação do motor em rpm, R é o raio da roda em mm e n é a relação de redução entre motor e roda.

$$v_{max} = \frac{\omega_{max} * R}{n} = \frac{10360 * 2 * \pi * 35 * 10^{-3}}{60 * 3,1} = 12,2 \frac{m}{s} = 44,1 \frac{km}{h} \quad (40)$$

A velocidade calculada superou o critério de velocidade máxima estabelecida pois o motor que melhor atende aos requisitos possui, segundo o fabricante, uma alta velocidade máxima de rotação. Uma maneira de resolver tal problema seria o aumento do tamanho da dimensão da polia, porém ela é limitada ao tamanho da roda. Uma outra maneira de resolver tal problema seria a troca do motor selecionado por um motor com as mesmas características e rotação menor porém não foi encontrado nada que pudesse substituí-lo.

2.7 Seleção Estrutural do Patins

Existem diversos modelos de patins que podem ser utilizados no modelo estrutural do projeto, porém deve-se escolher a solução que melhor atende os requisitos propostos. No projeto de um patins existem algumas características que devem ser analisadas para efetuar a melhor escolha da estrutura que deverá suportar o usuário e os componentes internos. Estas características são: disponibilidade de espaço para alocação dos componentes, adaptabilidade estrutural para eventuais modificações mecânicas e capacidade de suportar o limite máximo de massa do usuário.

Para avaliar as soluções vamos definir requisitos de projetos qualitativos e quantitativos relacionados à estrutura do patins.

Requisitos quantitativos:

- Limite máximo de massa suportável: 100kg;

Requisitos qualitativos:

- Disponibilidade espacial: a estrutura do patins deve ter espaço suficiente para alocar todos os componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos definidos anteriormente.
- Adaptabilidade estrutural: a estrutura do patins deve apresentar versatilidade para suportar modificações em sua estrutura.

Na Tabela 17 são listadas as soluções que melhor atendem aos requisitos propostos anteriormente.

Tabela 17 - Listagem de soluções avaliadas.

Nº da solução	Solução
1	Patins modelo In Line
2	Patins modelo Quad Line

2.7.1 Solução 1 - Patins Modelo In Line

Esta solução consiste em utilizar um patins modelo *In Line* (Figura 14) onde todas as rodas são dispostas em uma linha de modo a formar uma única linha com 4 rodas. As características da solução baseadas nos requisitos são apresentadas a seguir.



Figura 14 - Patins In Line.
Fonte: Monster Sports (2015a)

Disponibilidade espacial. Os componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos são alocados lateralmente à estrutura de sustentação do patins e é montada uma estrutura auxiliar para fixar os componentes. A vantagem é que o modelo possui dimensão lateral menor que a dimensão lateral do modelo *Quad Line*. A desvantagem é que todos os componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos estarão acoplados no lado externo do patins que por sua vez aumenta o risco de danificação do sistema.

Adaptabilidade estrutural. A estrutura de sustentação localiza-se exteriormente às rodas. A vantagem é a versatilidade de acoplamento de estruturas auxiliares para fixação de componentes. A desvantagem é que, devido à configuração estrutural do suporte das rodas, o modelo apresenta alta complexidade de projeto e fabricação da estrutura de transmissão de movimento do motor para as rodas.

2.7.2 Solução 2 - Patins Modelo Quad Line

Esta solução consiste em utilizar um patins modelo *Quad Line* (Figura 15) onde cada par de rodas são dispostas em uma linha de modo a formar duas linhas com duas rodas cada. As características da solução baseando-se nos requisitos são apresentadas a seguir.



Figura 15 - Patins Quad Line.
Fonte: Monster Sports (2015b)

Disponibilidade espacial. Os componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos são alocados internamente à estrutura de sustentação do patins e é montada uma estrutura auxiliar para fixar os componentes. A vantagem é que o modelo possui espaço interno para alocação dos componentes. A desvantagem é que o modelo possui dimensão lateral maior que a dimensão lateral do modelo *In Line*.

Adaptabilidade estrutural. A estrutura de sustentação localiza-se na parte interna do patins. A vantagem é que a localização das rodas no lado externo do patins facilita a adaptação da estrutura, permitindo a elaboração de um sistema de transmissão de movimento do motor para as rodas de forma mais simplificada. A desvantagem é que alguns componentes são alocados no lado externo como, por exemplo, a polia e a correia, o que aumentará a dimensão lateral total do patins.

2.7.3 Escolha da Estrutura

Para escolher a melhor solução estrutural do patins é utilizada uma matriz de decisão onde todas as soluções são avaliadas através de um sistema de atribuição de notas referente à cada requisito da mesma forma que foi realizado para a escolha do motor-redutor. Como o requisito quantitativo é mais crítico ele receberá um peso maior de ponderação em relação aos outros dois requisitos.

Tabela 18 - Notas das soluções por critérios.

Requisitos	Ponderador(1-2)	Solução	
		1	2
Limite máximo de massa suportável	2	9	9
Disponibilidade espacial	1	4	5
Adaptabilidade estrutural	1	3	5

Depois de classificar e avaliar as soluções por meio da análise de requisitos foram estabelecidas notas ponderadas para cada solução, as quais foram somadas e apresentadas na Tabela 19 e, assim, foi possível a classificação de cada solução frente às notas obtidas.

Tabela 19 - Notas totais das soluções.

Requisitos	Solução	
	1	2
Limite máximo de massa suportável	18	18
Disponibilidade espacial	4	5
Adaptabilidade estrutural	3	5
Total	25	28

Por meio da utilização da matriz de decisão chegou-se à conclusão de que a solução que melhor atende às necessidades do projeto é a solução 2, ou seja, um patins modelo *Quad Line* é utilizado como estrutura.

2.8 Seleção da Bateria

A próxima análise do projeto avaliará a bateria compatível com o motor escolhido. Os motores de aeromodelos são alimentados com bateria de Lítio Polímero (LiPo) cuja unidade de tensão é especificada em "S Lipoly" ou "S", de modo que cada unidade de "S" corresponde a uma célula da bateria e vale aproximadamente 3,7 V. Segundo o fornecedor, o motor Turnigy Aerodrive SK3 - 5055-280kv Brushless Outrunner deve ser alimentado com a tensão mínima de 6S, portanto deve-se assegurar que a bateria tenha no mínimo tensão de 6S e carga suficiente para manter o sistema funcionando por no mínimo 30 minutos.

Avaliando a necessidade de carga da bateria, utilizando a equação 17, substituindo os valores de torque e rotação na condição de regime em rampa inclinada $T_R = 4,47 \text{ N.m}$, $\omega_R = 455 \text{ rpm}$, o tempo de autonomia $t = 30 \text{ min}$ e a tensão da bateria $V = 22 \text{ V}$, obtém-se:

$$C = \frac{\omega_R T_R t}{V} = 4850 \text{ mAh} \quad (41)$$

Dessa forma, o modelo de bateria escolhido é o ZIPPY Flightmax 4000mAh 6S1P 20C, mostrado na Figura 16. A carga atende o requisito uma vez que não é esperado a utilização do dispositivo subindo uma rampa durante a autonomia completa da bateria, sendo assim o valor de carga necessária diminui em função da proporção de tempo de rampa e tempo em plano horizontal. Sendo um valor de 4000mAh suficiente para altas solicitações do motor durante os 30 minutos da autonomia.



Figura 16 - ZIPPY Flightmax 4000mAh 6S1P 20C.

2.9 Seleção do Acionador

Esta etapa consiste em determinar o controlador de velocidade compatível com o motor. Segundo o fornecedor, o motor Turnigy Aerodrive SK3 - 5055-280kv Brushless Outrunner deve ser alimentado com a tensão mínima de 6S e corrente máxima de 60A, portanto deve-se assegurar que o controlador consiga trabalhar com tensões de 6S e suporte a passagem de corrente de 60A. O modelo escolhido é o Hobbyking Red Brick 70A ESC mostrado na Figura 17.



Figura 17 - Hobbyking Red Brick 70A ESC.

O acionador recebe pulsos em formato PWM, contudo difere de motores convencionais onde os valores de potência máxima e mínima são obtidos com o ciclos de 100% e 0%. Acionadores do tipo ESC tem sua potência máxima e mínima quando o tempo em HIGH é de 2ms e 1ms respectivamente em um ciclo com período de 20ms, que representa 10% e 5% do ciclo do PWM.

2.10 Seleção do Microprocessador

As funções do microcontrolador são: recebimento de comandos, aplicação de uma função de controle e envio dos dados para o acionador do motor. O recebimento de comandos implica que o sistema deve ser capaz de efetuar comunicação serial com o receptor e deve possuir capacidade de processamento suficiente para processar os dados antes do próximo recebimento de comando. A função de controle necessita de um processador capaz de calcular funções matemáticas simples e deve possuir capacidade de armazenamento de dados suficiente para guardar o programa. O controlador deve possuir saída PWM para enviar dados para o acionador do motor. O microcontrolador Arduino Uno foi escolhido com base nas funções citadas anteriormente e também por se tratar de um controlador conhecido pelos autores. A Figura 18 apresenta o Arduino Uno utilizado.



Figura 18 - Arduino Uno.

2.11 Seleção do Receptor

O receptor de sinal Bluetooth é o intermediário entre o telefone móvel e o controlador. Ele realiza a comunicação via Bluetooth com o celular enquanto realiza uma comunicação serial com o controlador e a sua função é a de transmitir mensagens entre os componentes. Assim o receptor de sinal Bluetooth deve ser compatível com o controlador selecionado. Isso significa que a tensão dos sinais entre os componentes devem ser iguais e ambos devem se comunicar com a mesma taxa de transmissão de dados na comunicação serial (*baud rate*).

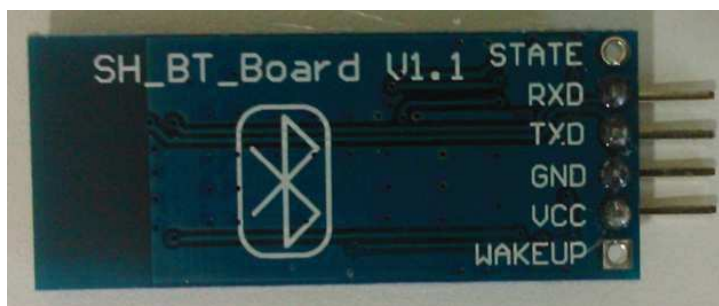


Figura 19 - Módulo HC-06 Bluetooth.

A Figura 19 mostra o módulo HC-06 selecionado, que possui quatro conexões, o "GND" que é o terra, "VCC" alimentação de 5V e os pinos "RX" e "TX" que fazem a comunicação serial entre o Arduino e o telefone móvel através da comunicação Bluetooth. Este módulo foi selecionado devido ao seu custo e a sua facilidade de utilização.

2.12 Programação

Os componentes programáveis são: o telefone móvel (celular) e o microcontrolador. No caso do celular, será utilizado a plataforma do MIT App Inventor 2 (MIT,2012) para desenvolver o programa que realiza a interface de comandos do usuário via telefone móvel. Essa interface utiliza as seguintes funcionalidades do telefone: Bluetooth, timer e acelerômetro. A plataforma de criação do aplicativo é restrito ao sistema operacional Android.

O Arduino possui a sua própria plataforma de programação em uma linguagem baseada em C. O programa deve receber os sinais da comunicação serial do receptor Bluetooth e enviar sinais para o acionador do motor através de uma saída PWM para ativar o motor.

2.12.1 Programação do Telefone Móvel

O aplicativo do telefone móvel realiza a interface do usuário com o patins e envia o comando de potência desejada no patins para o controlador do motor. Essa potência tem relação direta com a velocidade do patins, sendo apresentada no texto como "velocidade desejada". A interface desenvolvida é apresentada na Figura 20 e a programação se encontra no Apêndice A.

As especificações do programa do telefone móvel são:

- Enviar sinais codificados do telefone móvel para o receptor Bluetooth, que contém a informação de potência desejada pelo usuário. Sendo esta estabelecida pelos comandos do usuário na interface do aplicativo.
- Efetuar paradas de emergência do sistema caso o usuário ou telefone móvel sofram uma queda.

As funções do aplicativo visto pelo usuário são:

- Encontrar dispositivos Bluetooth. Pressionando-se o botão "Procurar", o telefone móvel procura os dispositivos Bluetooth próximos e lista-os. O receptor do patins deve aparecer nesta lista e deve ser selecionado.
- Conectar-se ao dispositivo. Pressionando-se o botão "Conectar", o telefone móvel e o receptor selecionado da lista iniciam os protocolos de comunicação, iniciando a comunicação serial.

- Desconectar-se do dispositivo. Pressionando-se o botão "Desconectar", que fica visível apenas quando o aplicativo estiver conectado a algum dispositivo, é desabilitada a conexão Bluetooth.
- Aumentar a velocidade. Pressionando-se o botão "+", o sistema aumenta a potência do patins, armazenando-a até receber um novo valor de velocidade.
- Diminuir a velocidade. Pressionando-se o botão "-", o sistema diminui a potência do patins, armazenando-a até receber um novo valor de velocidade.
- Parar o sistema. Pressionando-se o botão "Stop", é enviado um comando de potência nula que desativa as funções de alteração de velocidade.

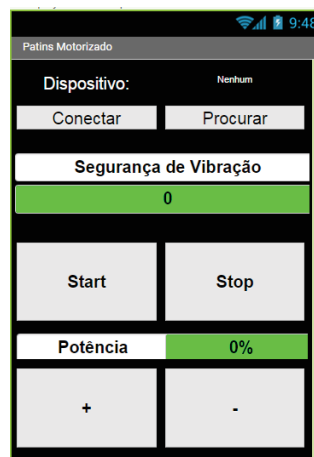


Figura 20 - Layout da interface no celular.

A Figura 21 apresenta o diagrama de componentes internos no celular. Cada dispositivo possui as seguintes relações com o programa principal:

- Bluetooth. Procura dispositivos para realizar o pareamento, devolvendo uma lista com os dispositivos encontrados. Realiza a conexão dessa comunicação, podendo também finalizá-la. Envia mensagens através da comunicação estabelecida. O protocolo da mensagem é formada pela concatenação da letra "i" com o caractere numérico da velocidade desejada, que varia entre 0 e 9, e finalizada com a letra "f".
- Timer. Dispositivo utilizado para manter um período bem definido entre os envios das mensagens enviadas ao receptor. A cada 50ms é disparado uma interrupção que envia os caracteres pela comunicação Bluetooth.

- **Acelerômetro.** Dispositivo utilizado para medir o valor absoluto da aceleração do telefone móvel. O controlador recebe a todo instante a aceleração do telefone móvel e compara com um limite de máximo de segurança, ou seja, movimentos bruscos como queda do celular ou queda do usuário serão detectados e ativarão a parada emergencial do sistema.
- **Interface Homem Máquina.** Dispositivo de interação com o usuário para visualizar o estado do programa e enviar comandos através dos botões. O sistema de controle do celular envia as informações para a interface, assim como também recebe os estados que os botões se encontram. O sistema de controle realiza a operação de bloqueio, remoção e aparecimento dos botões para o usuário.

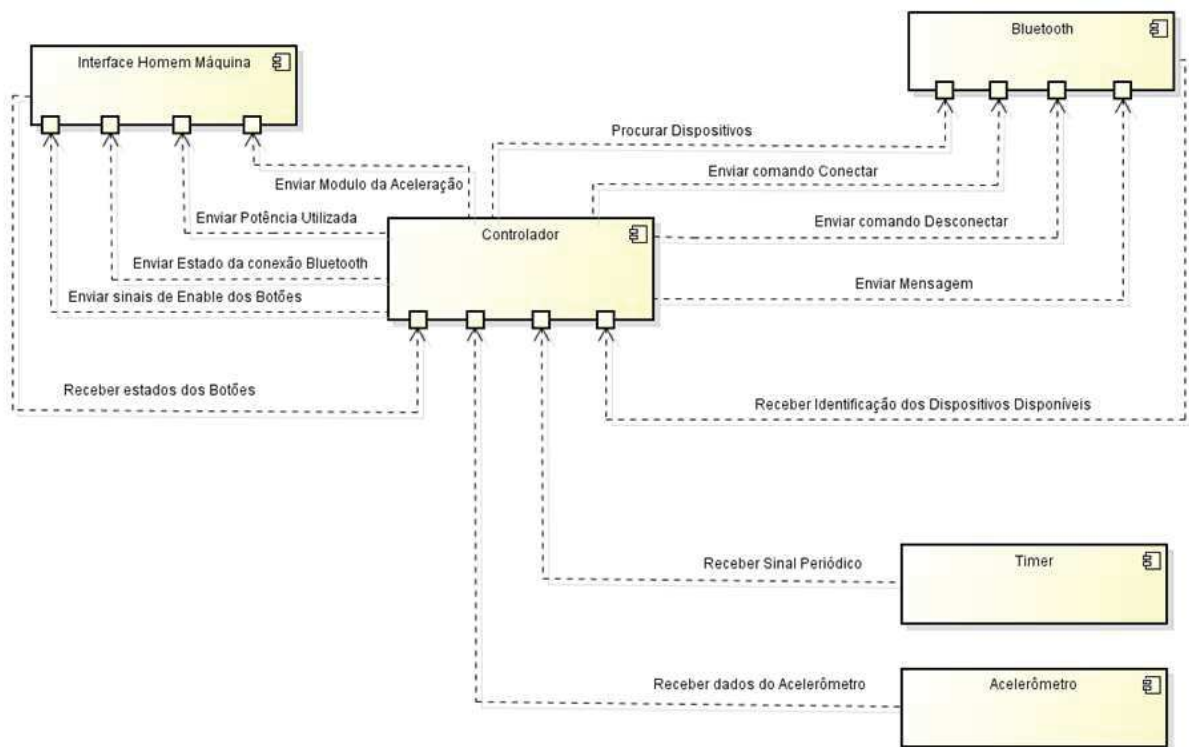


Figura 21 - Diagrama de componentes do celular.

2.12.2 Programação do Controlador

O microcontrolador utilizado para controle do motor é o modelo Arduino Uno. Esse recebe os sinais de velocidade desejada e envia o sinal de controle para o acionador do motor. A programação encontra-se no Apêndice B

As especificações do programa do controlador são:

- Receber sinais codificados do receptor Bluetooth, que representam a velocidade desejada do usuário. Aplicar um controle em malha aberta sobre a velocidade desejada e enviar o sinal para o acionador do motor.
- Efetuar paradas emergenciais do sistema caso a comunicação Bluetooth seja desconectada.

A Figura 22 apresenta o fluxograma do programa implementado no Arduino e o Apêndice B apresenta o código da programação. O programa consiste em duas partes, a primeira de configurações iniciais e a segunda de um *loop* de funcionamento.

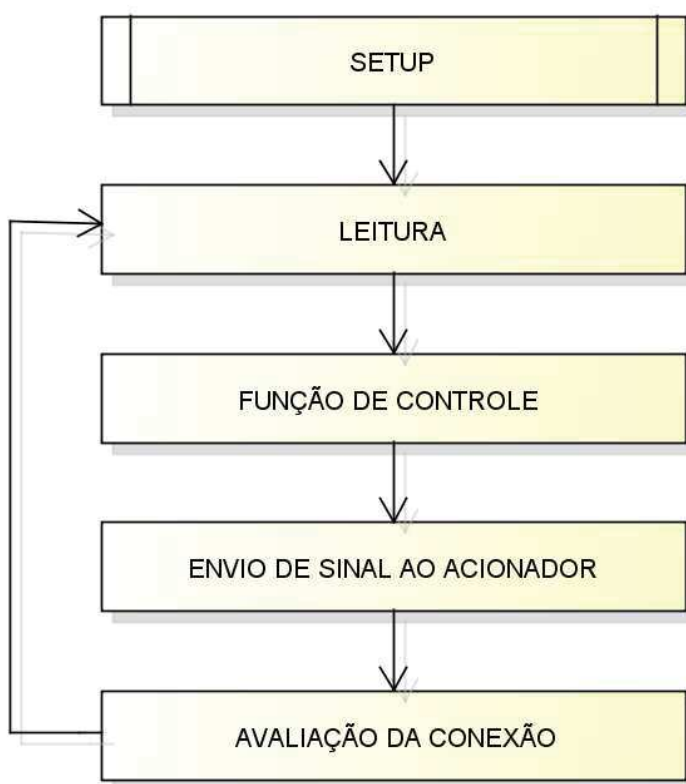


Figura 22 - Fluxograma do programa do controlador.

Na leitura é monitorado o *buffer* de entrada e ao detectar algum elemento ele verifica se este corresponde à letra "i", em caso positivo ele realiza a leitura do caractere numérico na sequência. A leitura é finalizada ao se detectar o elemento correspondente à letra "f". A partir desses dados é feita a lógica de controle, em que a velocidade desejada passa por um filtro de primeira ordem, também conhecido como "passa baixas" pois passa sinais de baixas frequências. Esse filtro faz com que o aumento e diminuição de velocidades seja algo gradual, suavizando o efeito de acelerações bruscas ao usuário.

O envio de sinais ao acionador é aplicado nas portas de saída do Arduino, observando a desativação das interrupções durante o envio. A verificação da conexão entre os dispositivos é feita por um contador de tempo entre os sinais de comando enviados pelo celular. Se o tempo entre dois sinais ultrapassar um limite estabelecido, os sinais de saída do Arduino para o acionador do motor são interrompidos.

A Figura 23 apresenta os componentes que interagem no programa. A interação entre componentes no Arduino é mais simples se comparada com a do celular. Os dispositivos e suas funcionalidade são:

- Acionador do Motor: o envio do comando é realizado pelo pino de saída digital que simula um PWM com frequência definida. Esse sinal é o valor obtido após passar pela malha de controle.
- Receptor Bluetooth: envia mensagem através da comunicação serial ao Buffer de entrada do controlador. O receptor envia a mensagem pelo pino TX e o Arduino recebe pelo pino RX. Esse sinal é decodificado e interpretado como a velocidade desejada pelo usuário.

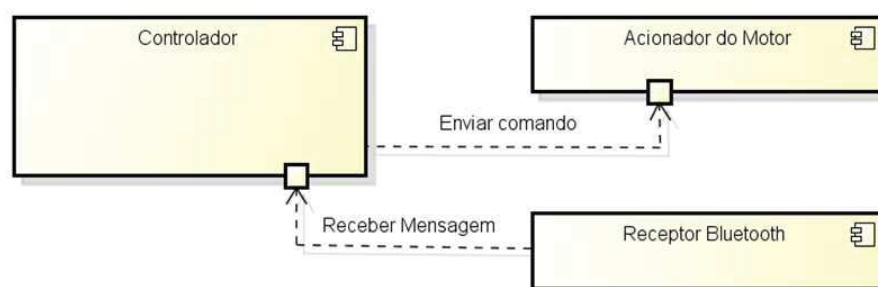


Figura 23 - Diagrama de componentes do Arduino.

2.13 Configuração do Circuito Elétrico

O circuito elétrico de acionamento do patins foi montado utilizando-se os componentes selecionados anteriormente. Os componentes são:

- Motor Turnigy Aerodrive SK3 - 5055-280kv Brushless Outrunner;
- Bateria ZIPPY Flightmax 4000mAh 6S1P 20C;
- Driver Hobbyking Red Brick 70A ESC;
- Microcontrolador Arduino Uno;
- Receptor Bluetooth.

Resumidamente, o circuito elétrico funciona da seguinte forma:

- I. O receptor Bluetooth envia uma mensagem através da porta TXD;
- II. O microcontrolador recebe-os através da entrada digital D3;
- III. O microcontrolador interpreta a mensagem e converte-o em sinais PWM que são enviados pela porta digital D9.
- IV. O acionador do motor recebe o sinal PWM do microcontrolador e converte-o em acionamento dos pólos do motor.

A bateria alimenta simultaneamente o driver com 22V e o microcontrolador com 7V. Um esquema do circuito elétrico está apresentado no Apêndice C.

2.14 Projeto Mecânico do Patins

Existem diversos métodos e caminhos para se chegar à uma solução mecânico-estrutural para o patins de forma simples e funcional. Dentre as características necessárias para a solução podemos destacar: espaço total disponível para acoplar todos os componentes do patins, rigidez estrutural e nível de dificuldade de fabricação da estrutura.

As etapas seguidas para o desenvolvimento do projeto mecânico do patins são as seguintes: listagem e medição dimensional de todos os componentes do patins, construção tridimensional dos componentes em software CAD, alocação manual em software CAD dos

componentes listados, elaboração de uma estrutura tridimensional baseada na posição dos componentes alocados, elaboração dos desenhos de fabricação e construção.

2.14.1 Projeto Estrutural

Após listar determinar as dimensões dos componentes iniciou-se a modelagem tridimensional de cada componente em um programa CAD. Após efetuar a modelagem, alocou-se os componentes no espaço interno disponível entre os eixos das rodas do patins com exceção da bateria. Devido às dimensões da bateria, ela não pôde ser alocada internamente à estrutura do patins e, portanto, foi necessária uma estrutura auxiliar para comportar e proteger a bateria.

A Tabela 20 e a Figura 24 apresentam, respectivamente, a listagem e a disposição dos componentes na estrutura do patins:

Tabela 20 - Lista de componentes da estrutura.

Numeração	Quantidade	Item
1	1	Bateria ZIPPY Flightmax 4000mAh
2	1	Microcontrolador Arduíno
3	1	Motor Turnigy Aerodrive SK3 - 5055
4	1	Driver Red Brick 70A ESC

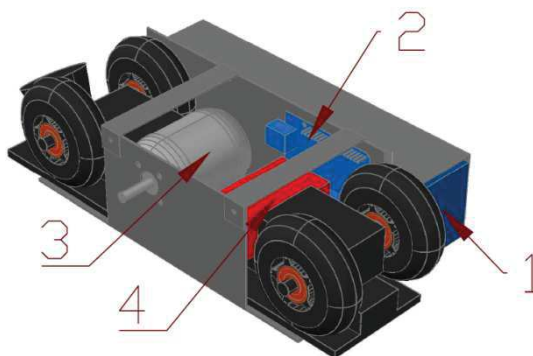


Figura 24 - Disposição dos componentes da estrutura.

Para fixar todos os componentes no patins foram construídas três estruturas, que por sua vez estão fixas na base da plataforma de suporte dos eixos do patins modelo *Quad-Line* escolhido anteriormente. O projeto das estruturas foi elaborado tendo como base duas características: utilização de processos simples de fabricação e eficiência de utilização do

espaço disponível. As três estruturas de suporte são feitas de chapas de alumínio de 1mm de espessura. A fixação dos componentes e dos suportes é feita por parafusos M3 e M4.

A tabela 21 e a Figura 25 apresentam, respectivamente, a listagem e a disposição das estruturas de suporte dos componentes:

Tabela 21 - Lista de estruturas de suporte.

Numeração	Quantidade	Item
1	1	Estrutura de suporte da bateria
2	1	Estrutura de suporte do motor
3	2	Estrutura de suporte auxiliar

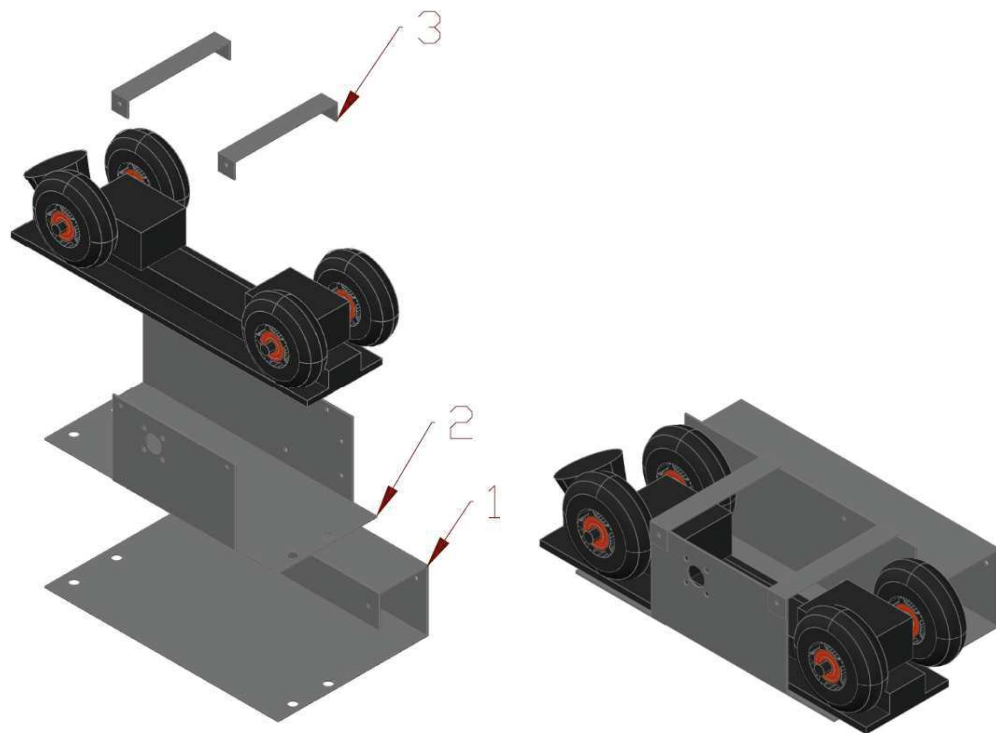


Figura 25 - Disposição da estrutura de suporte dos componentes.

Após a elaboração dos modelos tridimensionais das estruturas efetuou-se as projeções das estruturas de suporte em vistas bidimensionais para obter os desenhos de fabricação. Os desenhos de fabricação estão disponíveis no Apêndice D. Por meio dos desenhos de fabricação a estrutura foi construída e montada seguindo a ordem da Figura 25.

Depois de montado, todos os componentes do patins foram alocados internamente à estrutura de suporte. O resultado é apresentado na Figura 26.



Figura 26 - Vista lateral e frontal do patins com a estrutura montada.

2.14.2 Projeto da Transmissão

A transmissão de movimento entre o motor e a roda é feita por um conjunto de polias e correias sincronizadoras. De forma a aumentar o torque do motor, a polia de menor diâmetro é acoplada no eixo do motor e a polia de maior diâmetro é acoplada na roda. Observa-se que o eixo das rodas no patins utilizado como base é fixo e que o movimento ocorre em razão de um conjunto de rolamentos preso às rodas. Devido à essa limitação estrutural de movimento do eixo das rodas do patins, optou-se por motorizar apenas uma das rodas ao invés do eixo. Para efetuar o acoplamento foi necessário comprar e fabricar as polias baseando-se nas necessidades do projeto.

As polias utilizadas no projeto de transmissão de movimento são apresentadas na seção 2.5. Para fixar a polia de maior diâmetro (HTD 3m 53,5 mm) na roda do patins foi necessário acrescentar 6 furos na polia de modo que um dos furos é responsável por permitir a passagem de uma ferramenta para fixar a roda e os outros 5 furos são responsáveis por permitir a passagem de cinco parafusos M4 que fazem o acoplamento da polia na roda.

Para fixar a polia de menor diâmetro (HTD 3m 17,2 mm) no eixo do motor foi necessário acrescentar 1 furo para a passagem do eixo do motor e 1 rosca para a passagem de um fuso M4 para fixar a polia no chanfro do eixo do motor.

A Tabela 22 e a Figura 27 apresentam, respectivamente, a listagem e a disposição dos componentes responsáveis pela transmissão de movimento entre o eixo do motor e a roda do patins.

Tabela 22 - Lista de componentes da transmissão de movimento.

Numeração	Quantidade	Item
1	5	Parafuso M4
2	1	Polia sincronizadora HTD 53 mm
3	1	Polia sincronizadora HTD 17 mm
4	1	Correia sincronizadora

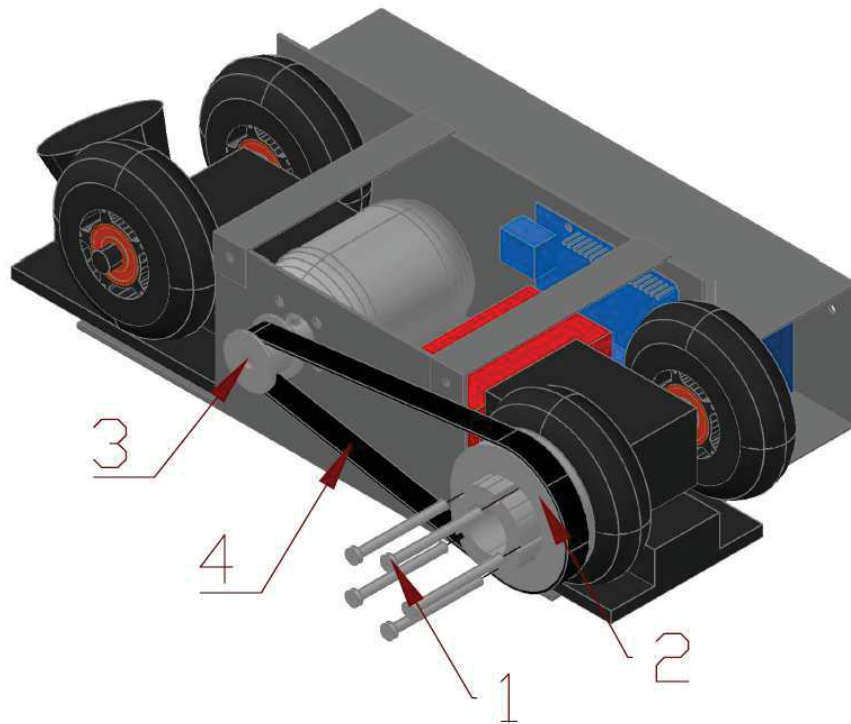


Figura 27 - Disposição dos componentes da transmissão de movimento.

Os desenhos de fabricação com as modificações das polias estão disponíveis no Apêndice D e as fotos das polias são apresentadas na figura 28.



Figura 28 - Polias modificadas.

2.15 Protótipo

Todos os componentes responsáveis pela transmissão de movimento foram acoplados à estrutura principal do patins e assim foi construído o protótipo do patins. O resultado da construção do protótipo é apresentado na figura 29.



Figura 29 - Vista lateral e inferior do protótipo.

2.16 Resultados

Para os requisitos propostos são realizados cinco testes com o objetivo de verificar o desempenho do patins, esses são: um cinemático para avaliar a velocidade, um cinemático para a aceleração, um de carregamento para avaliar a capacidade de carregar uma pessoa com a massa especificada, um de inclinação para avaliar a capacidade de subir rampas com a inclinação proposta e um de autonomia para avaliar o tempo máximo de funcionamento do protótipo.

2.16.1 Velocidade

Para validar o requisito de velocidade de 6 km/h foi realizado o seguinte experimento: Utilizou se uma esteira de corrida com o patins de forma a atingir o equilíbrio de velocidade entre o usuário e a esteira. Esse teste foi realizado para certos valores de potência do patins e a sua relação com os valores de velocidade observados pelo medidor da própria esteira são apresentados na Tabela 23. O teste do patins com a esteira está representado na Figura 30. Devido à instabilidade de movimento para valores altos de potência, os testes foram limitados em até 44% da potência.



Figura 30 - Patins em equilíbrio de velocidade com uma esteira.

Tabela 23 - Teste de velocidade com esteira.

Potência (%)	Velocidade Marcada pela Esteira (km/h)
22	4,1
33	8,2
44	12,0

O requisito de velocidade máxima está validado, pois o experimento gera resultados de velocidade superiores ao descrito. Observando que a velocidade máxima do protótipo é superior, pois os testes foram apenas em 44% da potência do motor.

2.16.2 Aceleração

Para validar o requisito de aceleração de $0,5 \text{ m/s}^2$ foi realizado o teste com o usuário andando com o patins em um trajeto de distancia conhecida partindo do repouso. Durante o trajeto o controlador tem sua potência elevada gradativamente, de tal maneira que a potência no final do trajeto tenha chegado em 33%. A Figura 31 e 32 apresenta o inicio e fim do teste respectivamente, a medição do tempo é feito através dos frames do vídeo gravado.



Figura 31 - Teste de aceleração | Posição inicial.



Figura 32 - Teste de aceleração | Posição final.

Para calcular a aceleração média do percurso, considerando que a velocidade inicial seja nula, é utilizada a equação 42. O valor de tempo para o trajeto é de 4,1s enquanto o comprimento do trajeto tem o total de 3m. A aceleração média calculada é de 0,36 m/s².

$$a = \frac{2 \Delta S}{\Delta t^2} \quad (42)$$

O requisito de aceleração está validado para o valor médio de 0,36 m/s². Contudo seu valor pode ser mais elevado caso seja feito um teste em que o sistema varie a velocidade desejada de 0% a 100% em um único comando e também caso seja removido o filtro de primeira ordem.

2.16.3 Inclinação

Para validar o requisito de mobilidade em pisos com inclinação foi realizada um teste com um usuário em uma rampa. A inclinação dessa rampa é de 8° medida com um transferidor e uma régua de nível. O usuário inicialmente em repouso ativa o patins para avançar na rampa, contudo o resultado foi negativo para esse teste. O patins ao ser ativado não sobe a rampa, mesmo não havendo escorregamento entre a roda motorizada e o chão e com o motor em pleno funcionamento. O motivo da impossibilidade da subida do patins se deve ao escorregamento entre a polia e a correia no sistema de transmissão, que ocorre quando a correia não está suficientemente tensionada contra as polias, ou seja, está frouxa. A solução para este problema é a implementação de um tensionador na estrutura para aumentar a tensão na correia, porém ele não pôde ser implementado devido à limitação do tempo restante destinado ao projeto. Assim o requisito de inclinação do protótipo não cumpre o valor requisitado.

2.16.4 Carregamento

O teste para validar o requisito de massa suportável de 100kg consiste em avaliar se um usuário com essa massa especificada consegue utilizar o patins. Testes foram realizados com usuários na faixa de 60kg apresentado na Figura 33.



Figura 33 - Testes com usuários na Faixa de 60kg.

Para a validação do requisito completo, é necessário realizar testes com pessoas externas ao projeto que possuam a massa especificada, contudo para isso é necessário a devida documentação para testes com pessoas pois os testes envolvem questões relacionadas à segurança. A utilização do patins com usuários portando um carregamento que complemente a massa até o valor especificado é inviável por comprometer o equilíbrio na utilização do protótipo. Assim o requisito de carregamento está validado apenas para a faixa de 60kg.

2.16.5 Autonomia

Para avaliar a autonomia de 30 minutos foi realizado um teste de tempo de funcionamento do protótipo. O experimento consiste em utilizar o patins em potencia máxima durante o período proposto em plano inclinado, porém esse teste é inviável pois necessitaria de um

usuário em uma pista inclinada mantendo o funcionamento do patins ininterruptamente. Como teste alternativo foi mantido o patins em potência máxima sem carga, durante trinta minutos. O resultado é que o patins continuou em funcionamento, observando que a mesma bateria foi utilizado para todos os outros testes sem precisar recarregá-la. Assim o requisito de autonomia do protótipo cumpre o valor requisitado.

2.17 Custos do Protótipo

A Tabela 24 apresenta os custos dos componentes do projeto. A tabela não inclui custos de entrega dos componentes ou impostos de importação. A utilização da oficina mecânica, a doação da chapa metálica, o trabalho realizado pelo técnico da oficina da Escola Politécnica não geraram custo mas seriam incluídos para uma análise mais detalhada do produto. Componentes como parafusos, porcas, arruelas, plásticos, fita adesiva, espuma e *jumpers* também não foram considerados nos custos pois os integrantes do projeto tinham disponibilidade deles.

Tabela 24 - Custos do protótipo.

Componente	Qtd	Valor Unitário	Valor Total
Correia Sincronizadora	1	22,50	22,50
Polia 18mm 3M9 Alum	1	46,00	46,00
Polia 56mm 3M9 Alum	1	112,00	112,00
Rolamento ABEC5	16	1,24	19,80
Patins Classico Roller Derby Viper	1	369,90	369,90
Roda Patins 70mm	8	14,98	119,80
Bluetooth HC-06	1	64,00	64,00
Arduino Uno R3	1	95,00	95,00
Turnigy Aerodrive SK3 - Outrunner Motor	1	148,12	148,12
HobbyKing Red Brick 70A ESC	1	61,00	61,00
ZIPPY Flightmax 4000mAh 6S1P 20C	1	130,66	130,66
Total			1188,78

Os custos do protótipo equivalem ao mesmo valor de aquisição de um patins motorizado no mercado norte-americano.

3 Conclusões

O projeto aborda o desenvolvimento de um protótipo de um veículo individual de pequeno porte controlado através de um aplicativo de celular. Por meio da aplicação de uma metodologia de projeto que engloba aspectos de modelagem física, seleção de componentes e projetos de integração entre mecânica, eletrônica e programação, foi desenvolvido um protótipo de um veículo individual de transporte de pequeno porte que consiste em um patins motorizado. Esse patins passou por testes experimentais para verificar se os requisitos de projeto são satisfeitos. A análise dos requisitos comprova a viabilidade da construção do patins motorizado para efetuar a locomoção de pessoas em curtas e médias distâncias com a velocidade de uma pessoa correndo.

Para um trabalho futuro, aspectos que podem ser melhorados no projeto do patins são: melhoria da rigidez estrutural de sustentação do motor do patins, utilização de uma bateria com dimensões que permitam sua inserção na estrutura interna do patins e a implementação de um tensionador de correia para o sistema de redução.

Referências Bibliografia

Chavand, Paul. Rollkers. [Online] [Citado em: 23 de Março de 2015.] <http://www.rollkers.com/>.

Correias Schneider. 2015. [Online] 2015. [Citado em: 15 de junho de 2015.] <http://www.polias.com.br/correias-sincronizadoras-omega.html>.

Development of a Personal Motor Roller. **Lim, Hum-ok e Tamai, Hiroyuki. 2007.** Seoul, Korea : COEX, 2007. International Conference on Control, Automation and Systems. pp. 17-20.

HobbyKing. 2015a. [Online] 2015a. [Citado em: 02 de junho de 2015.] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__18129__Turnigy_Aerodrive_SK3_6374_192kv_Brushless_Outrunner_Motor.html.

—. **2015b.** [Online] 2015b. [Citado em: 02 de junho de 2015.] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__18175__Turnigy_Aerodrive_SK3_5055_280kv_Brushless_Outrunner_Motor.html.

—. **2015c.** [Online] 2015c. [Citado em: 02 de junho de 2015.] http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__18123__Turnigy_Aerodrive_SK3_4250_500kv_Brushless_Outrunner_Motor.html.

Lauren, Nick. Apr.17,2007. 7,204,330 B1 United States Patent, Apr.17,2007.

Massachusetts Institute of Technology. 2012. MIT App Inventor. [Online] 2012. [Citado em: 25 de maio de 2015.] <http://appinventor.mit.edu/explore/>.

McKinzie, Bradley K. Mar. 8, 2011. 7,900,731 B2 United States Patent, Mar. 8, 2011.

RobotShop. 2015c. [Online] 2015c. [Citado em: 01 de junho de 2015.] <http://www.robotshop.com/en/12v-780rpm-2400-oz-in-planetary-gearmotor.html>.

—. **2015a.** [Online] 2015a. [Citado em: 01 de junho de 2015.] <http://www.robotshop.com/en/banebots-p60-gearbox-26-1-no-grease.html>.

—. **2015b.** [Online] 2015b. [Citado em: 01 de junho de 2015.] <http://www.robotshop.com/en/banebots-rs-540-motor.html>.

Secretaria Municipal da Pessoa com Deficiência e Mobilidade Reduzida (SMPED). 2004. Manual de instruções Técnicas de Acessibilidade para apoio ao projeto arquitetônico. São Paulo : Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2004.

—. Manual de instruções Técnicas de Acessibilidade para apoio ao projeto arquitetônico. São Paulo : Imprensa Oficial do Estado de São Paulo.

Tarjan, Peter, et al. 1994. Rolling Footwear - A Novel Ambulatory Aid. s.l. : Dept. Of Medicine, and Dept of Orthopaedics and Rehabilitation, School of Medicine University of Miami, 1994.

Treadway, Peter. 2012. spnKiX - Wearable Mobility. *Kickstarter*. [Online] 2 de Fevereiro de 2012. [Citado em: 2015 de Março de 23.] <https://www.kickstarter.com/projects/petertreadway/spnkix-wearable-mobility>.

APÊNDICE A - Programação do Android

A programação de um telefone móvel usando o MITAppInventor utiliza blocos pré-definidos. A programação é parecida com a linguagem C. Existem blocos de criação de variável, alteração de valor de variável, comando "If", comando "While", comando "For" e comandos de interrupção. Os blocos que utilizam interrupção são: botões da interface, timer e acelerômetro. O programa desenvolvido monitora cada interrupção constantemente e quando alguma é chamada, ele executa o bloco e depois retorna ao estado de monitoramento.

i. Criação de variáveis:

- "Device": variável tipo string que armazena o nome do componente por onde será feita a comunicação Bluetooth.
- "MaxAccel": variável tipo int, que armazena o valor limite de aceleração do celular, utilizado para realizar paradas de emergência.
- "TotalAccel": variável tipo int, que armazena o valor da aceleração medida pelo acelerômetro do telefone móvel.
- "PassoDaPotencia": variável tipo int, que armazena o valor a ser alterado na velocidade desejada pressionando-se o botão de "+" ou "-" .
- "PotenciaPatins": variável tipo int, que armazena o valor de velocidade desejada do usuário.



Figura 34 - Inicialização das Variáveis.

- ii. Seleção de Bluetooth disponíveis: quando o botão "procurar" é pressionado, são listado os dispositivos Bluetooth e seus respectivos nomes. O dispositivo selecionado, é armazenado na variável "Device" e seu nome apresentado na tela.



Figura 35 - Seleção de Bluetooth Disponíveis.

- iii. Conectar ao dispositivo Bluetooth Selecionado: quando o botão de "Conectar" for pressionado, será realizado os protocolos de comunicação e caso ocorra algum erro o sistema enviará uma aviso.

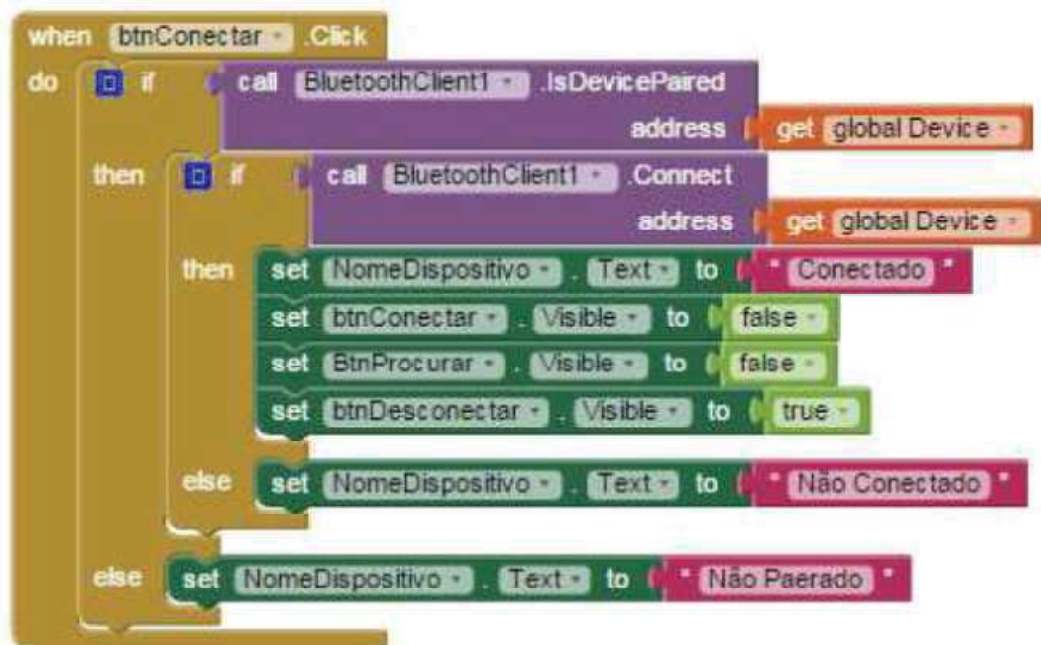


Figura 36 - Conectar ao dispositivo Bluetooth Selecionado.

- iv. Desconectar a conexão Bluetooth: quando o botão de "Desconectar" for pressionado, os protocolos de comunicação serão finalizados.

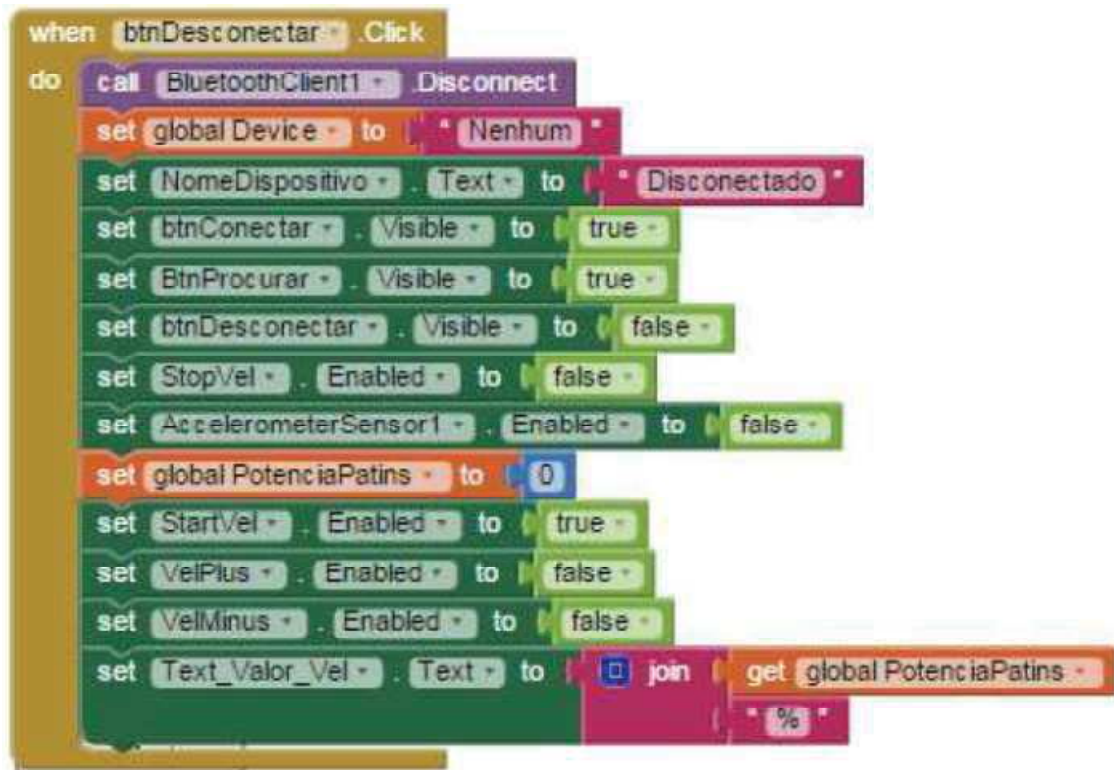


Figura 37 - Desconectar a conexão Bluetooth.

- v. Iniciar Sistema de Velocidade: ao pressionar o botão "Start" o sistema habilita a alteração de velocidade.



Figura 38 - Iniciar Sistema de Velocidade.

- vi. Parar Sistema de Velocidade: ao pressionar o botão "Stop" o sistema desabilita a alteração de velocidade e estabelece valor nulo para velocidade desejada.

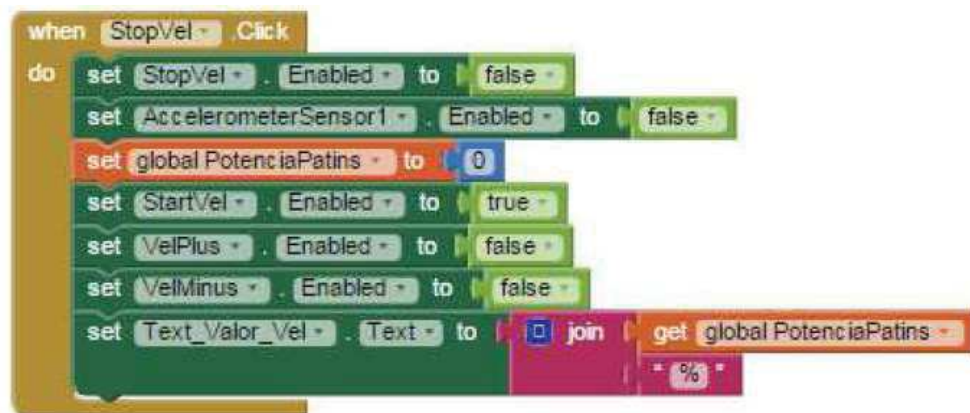


Figura 39. - Parar Sistema de Velocidade.

- vii. Aumento de Velocidade do patins: ao pressionar o botão "+" o sistema aumenta a velocidade desejada através da variável "Potencia Patins".

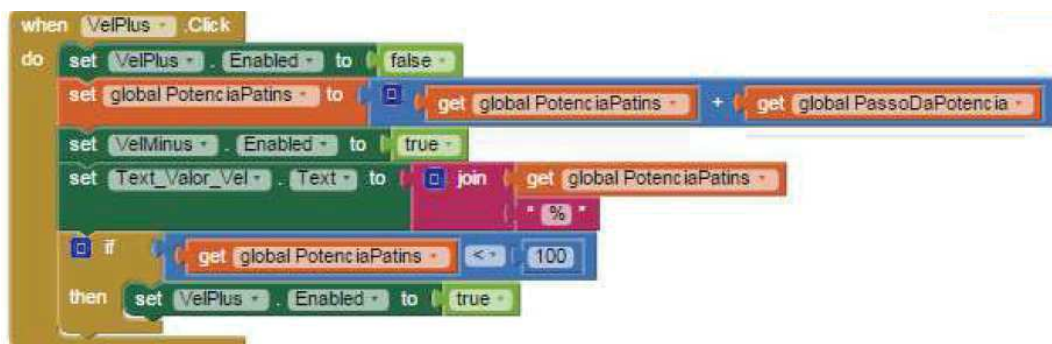


Figura 40 - Aumento de Velocidade do Patins.

- viii. Diminuição da Velocidade do patins: ao pressionar o botão "-" o sistema diminui a velocidade desejada através da variável "Potencia Patins".

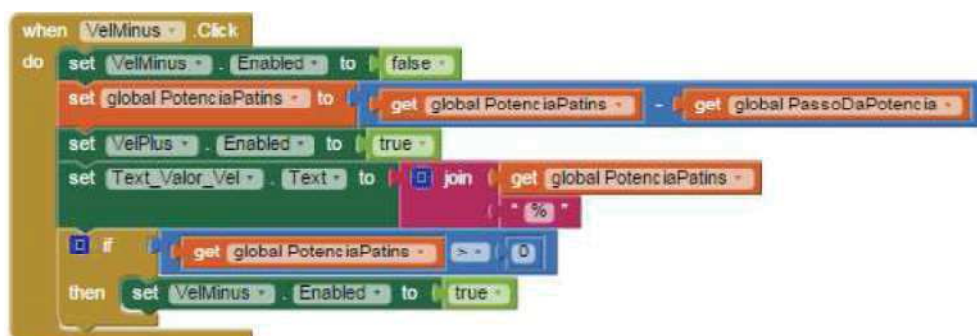


Figura 41 - Diminuição da Velocidade do Patins.

- ix. Envio de sinal via Bluetooth a cada tempo do Timer: a cada período de tempo é enviado a mensagem que contém a velocidade desejada do patins, com a letra "i" antes do valor e a letra "f" no final.

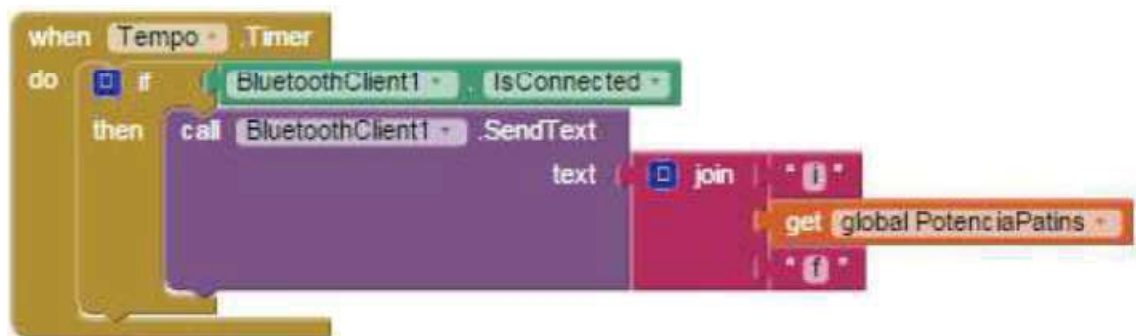


Figura 42 - Envio de Sinal via Bluetooth.

- x. Cálculo da aceleração do acelerômetro e desativação emergencial: o modulo da aceleração medida no acelerômetro é armazenada na variável "totalAccel" e é comparada com "MaxAccel". Quando ela for superior ao máximo definido, o sistema realiza a parada emergencial.

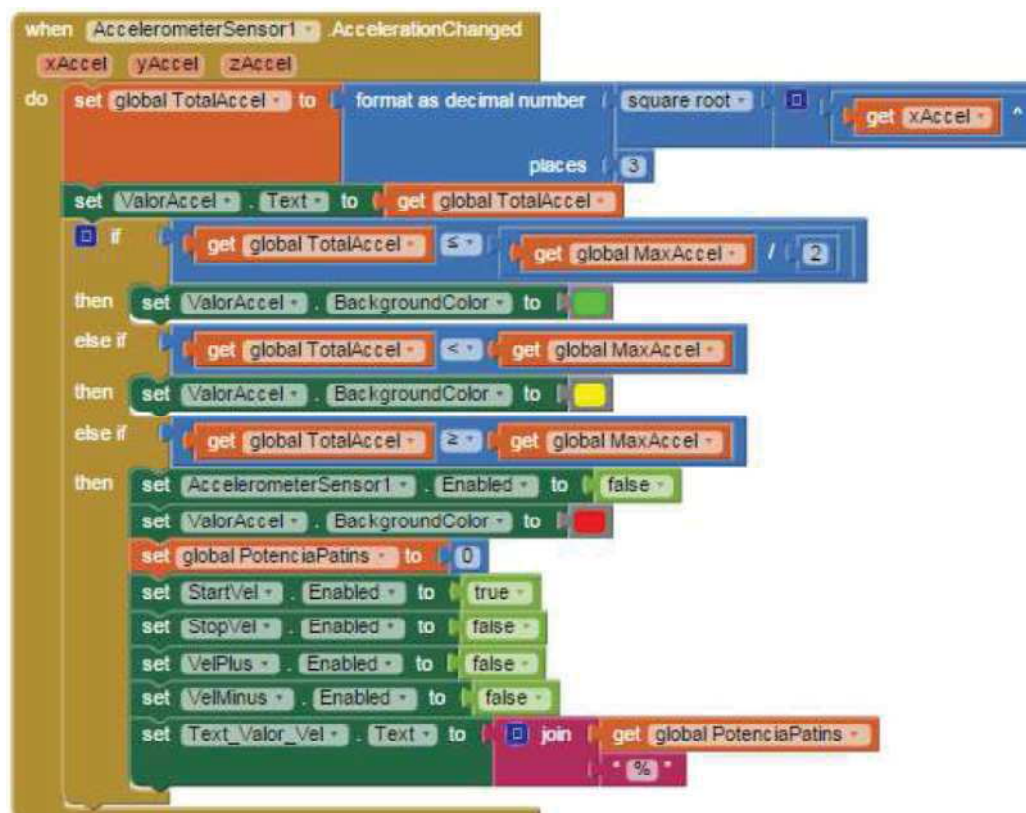


Figura 43 - Parada Emergencial.

APÊNDICE B - Programação do Arduino

A programação do Arduino inicia com a definição dos parâmetros, variáveis e bibliotecas que são utilizadas. A função inicialmente chamada é a **SETUP**, que consiste em iniciar as saídas e entradas que o Arduino utiliza assim como a taxa de comunicação serial. Após isso o programa entra no *loop* principal, onde são executadas as funções de alto nível. O *loop* consiste fundamentalmente da leitura do *buffer* de recepção, controle do sistema e envio de sinal. As outras funções incluídas neste *loop* são: o elemento de segurança que avalia se a comunicação Bluetooth está ocorrendo, um sistema que previne que o *Buffer* de recepção fique cheio, e o sistema opcional de envio de informações para o computador para avaliar as variáveis durante a execução do programa. A listagem do programa é apresentada a seguir.

```
// -----
```

```
// POLI 2015 - 2º Sem
```

```
// TCC - Patins Motorizado
```

```
// Dalton Y. I. & Renan V. D.
```

```
// -----
```

```
//Incluindo bibliotecas externas
```

```
#include <SoftwareSerial.h> //Biblioteca de comunicação TX RX
```

```
//Definindo Pinos de entrada e saída
```

```
#define MOTOR_SIGNAL_PIN      9 //Pino que deve ser conectado o fio de sinal do driver
```

```
#define Serial_RX              3 //RX is digital pin 3 (connect to TX of other device)
```

```
#define Serial_TX              2 //TX is digital pin 2 (connect to RX of other device)
```

```
//Definindo Parametros
```

```
#define SERIAL_BAUDRATE 57600 //Definindo baudrate da comunicação serial
```

```
#define TAMANHO_MENSAGEM 3 //Qtd. de caracteres em uma mensagem do celular
```

```
#define TAMANHO_BUFFER 30 //quantidade de caracteres maxima no buffer do arduino
```

```
#define CELULAR_SETPPOINT_PASSO 11 //codificação do valor enviado pela mensagem, em  
passo de potencia
```

```
#define CELULAR_TIME_OUT 1000 //Tempo em miliseg maximo para receber comunicação
```

```

#define MOTOR_OUT_MAX 2000 //Tempo em microseg do sinal em HIGH enviado ao driver
- Representa Potencia Maxima
#define MOTOR_OUT_MIN 950 //Tempo em microseg do sinal em HIGH enviado ao driver -
Representa Potencia Minima
#define AMOSTRAGEM 10 //Tempo em miliseg de amostragem e ativação dos dados
#define FILTRO_1ORDEM_TEMPO 1000 //Tempo em miliseg do filtro de 1º ordem

// Comunicação com o Receptor Bluetooth
SoftwareSerial serial_arduino_receptor(Serial_RX, Serial_TX); // RX, TX

//Definindo as variaveis globais utilizadas
double motor_Out = MOTOR_OUT_MIN ; //valor que será colocado na saída do motor
int celular_SetPoint = 0; //valor de 0 a 100% da potencia desejada do motor
int celular_Char_Received = 0; //Ele é lido em int, utilizar tabela ASCII para conversão
int celular_Time_Counter = 0; //contador de tempo
int celular_Char_Counter = 0; //contador de caracteres recebidos
boolean celular_Communication_ok = true; //validação da mensagem recebida

//Inicialização do programa
void setup()
{
    // Comunicação com o Computador para LOGS
    Serial.begin(SERIAL_BAUDRATE);
    delay(10);

    // Comunicação com o Receptor Bluetooth
    serial_arduino_receptor.begin(SERIAL_BAUDRATE);
    delay(10);
    serial_arduino_receptor.listen();
    delay(10);

    //Selecionando o pino do arduino que envia sinal ao driver e inicia com valor minimo
    pinMode(MOTOR_SIGNAL_PIN, OUTPUT);
    delay(10);
    digitalWrite(MOTOR_SIGNAL_PIN, LOW);
    delay(10);
}

//Leitura da mensagem do celular
void Leitura(){

```

```

int Local_Value = 1000;
//Verificação se o buffer de entrada possui uma mensagem completa EX: "i1f" "i2f" "i3f"
"i4f" "i5f" "i6f" "i7f" "i8f" "i9f"
if (serial_arduino_receptor.available() > TAMANHO_MENSAGEM){
    //Setagem do timer limit de recepção de sinal como 0;
    celular_Time_Counter = 0;

    //Leitura do buffer de entrada, lendo apenas um character
    celular_Char_Received = serial_arduino_receptor.read();

    Serial.print("\ti="); Serial.print(char(celular_Char_Received));

    //se o comando de inicio for dado (Caracter i), caso contrario ignora
    if(celular_Char_Received == 'i'){

        //Leitura do SetPoint codificado pelo passo
        celular_Char_Received = serial_arduino_receptor.read();

        //Converte texto para numeros (48 é 0 e 57 é 9, pela tabela ASCII)
        if(48 <= celular_Char_Received && celular_Char_Received <= 57){
            Local_Value = CELULAR_SETPOINT_PASSO*(celular_Char_Received-48);
        }

        Serial.print("\t0="); Serial.print(char(celular_Char_Received));

        //Leitura do comando de finalização de mensagem (Caracter f), caso contrario invalida o
valor
        celular_Char_Received = serial_arduino_receptor.read();
        if (celular_Char_Received == 'f'){

            Serial.print("\tf="); Serial.print(char(celular_Char_Received));

            //Validação do valor local entre 0 e 100
            if(0 <= Local_Value && Local_Value <= 100){
                //Alteração do SETPOINT enviado pelo celular
                celular_SetPoint = Local_Value;
            }
        }
    }
}
}
}
}

```

```

//transformando o valor recebido pelo celular na saída do motor pela função de controle
void Controle_Malha_Aberta (){
    double local_SetPoint = map(celular_SetPoint, 0, 100, MOTOR_OUT_MIN ,
    MOTOR_OUT_MAX);
    //filtro primeira ordem
    motor_Out = motor_Out + ((local_SetPoint -
    motor_Out)*AMOSTRAGEM)/FILTRO_1ORDEM_TEMPO ;
}

//Envia sinal para o motor
void Envia_Sinal(){
    noInterrupts();
    digitalWrite(MOTOR_SIGNAL_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(int(motor_Out));
    digitalWrite(MOTOR_SIGNAL_PIN, LOW);
    interrupts();
}

//Contagem de timeout da conexão
void Time_Out_Connection(){
    //Caso perca a comunicação. desativar o motor
    if (celular_Time_Counter > CELULAR_TIME_OUT){
        //Desativando sinal recebido do celular
        celular_SetPoint = 0;
    }
    celular_Time_Counter = celular_Time_Counter + AMOSTRAGEM;
}

//Limpa o buffer se ele atinge a capacidade maxima
void Buffer_Overflow(){
    //avalia se o buffer esta cheio
    if( serial_arduino_receptor.available() > TAMANHO_BUFFER){
        //limpa buffer
        for(int k=1; TAMANHO_BUFFER > k ; k++) {
            celular_Char_Received = serial_arduino_receptor.read();
        }
        //limpa o timeout de comunicação, pois está recebendo
        celular_Time_Counter = 0;
    }
}

```

```

//Logs para leitura e identificação do sistema
void Logs(){
  Serial.print("\tCel_Sin\t"); Serial.print(celular_SetPoint);
  Serial.print("\tMot_Sin\t"); Serial.print(int(motor_Out));
  Serial.print("\tTimeOut\t"); Serial.print(celular_Time_Counter);
  Serial.print("\tBUFFER\t"); Serial.print(serial_arduino_receptor.available());
  Serial.print("\tTime\t"); Serial.print(millis());
  Serial.print("\n");
}

//Loop permanente do programa
void loop() // run over and over
{
  Leitura();
  Controle_Malha_Aberta ();
  Envia_Sinal();

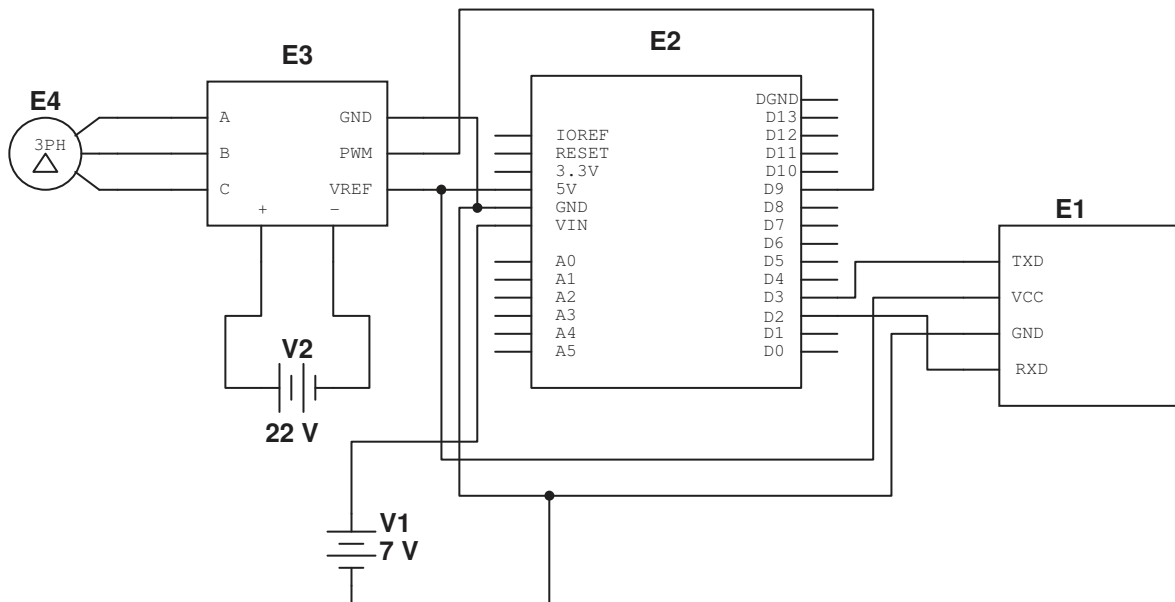
  Time_Out_Connection();
  Buffer_Overflow();
  //Logs(); //Descomentar para enviar logs ao Computador

  delay(AMOSTRAGEM - motor_Out/1000);
}

```

APÊNDICE C - Circuito Elétrico

Circuito elétrico do controlador.

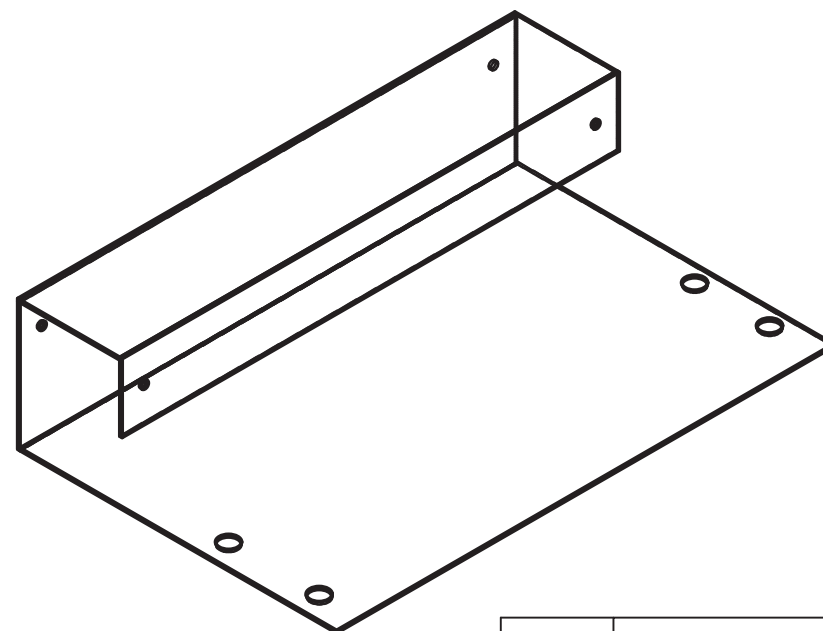
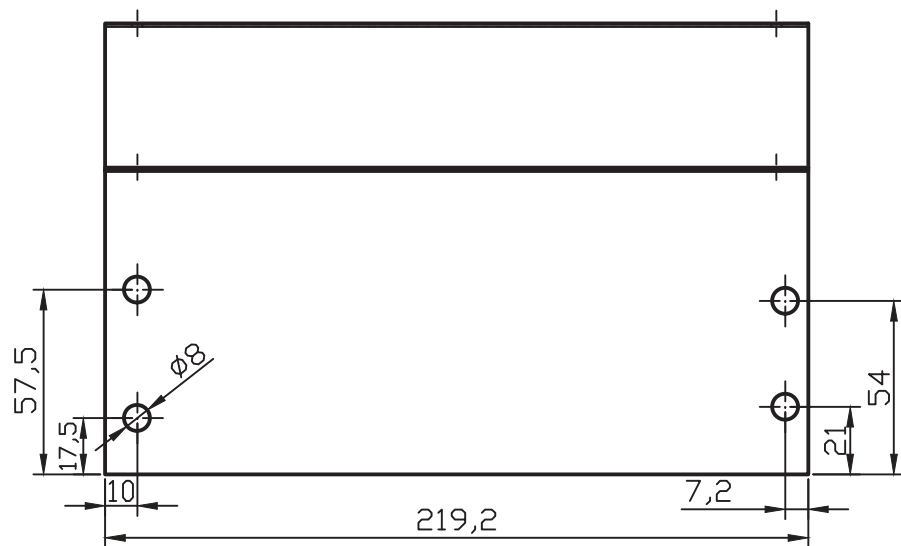
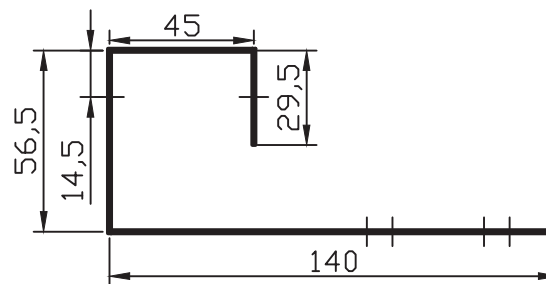
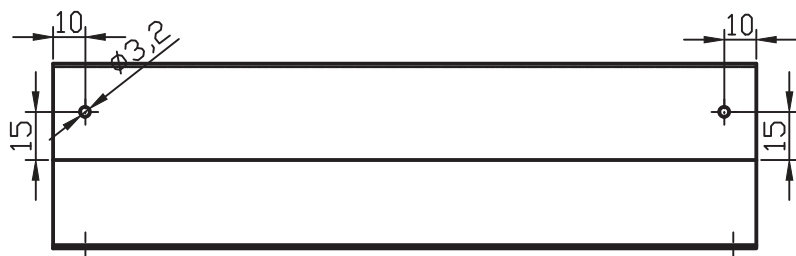


Lista de Componentes			
Id.	Naveg.	Qntd.	Designação
1	E1	1	Receptor Bluetooth
2	E2	1	Arduíno
3	E3	1	Driver
4	E4	1	Motor

Título: Apêndice C - Circuito Elétrico	
Data: 27/09/2015	Versão: 1.1
Autor: Dalton Y. Ishizaki e Renan V. Dias	

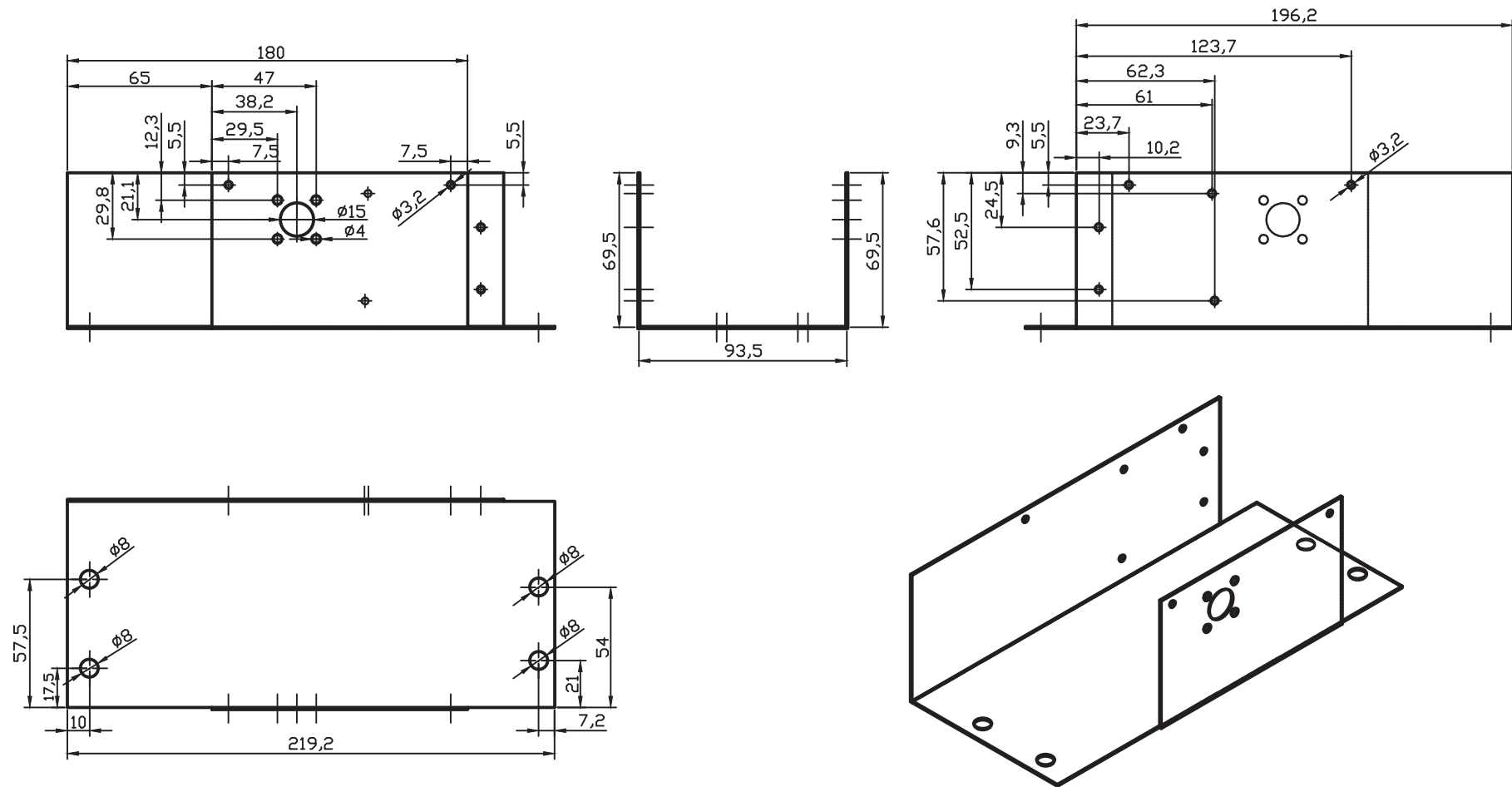
APÊNDICE D - Desenhos de Fabricação

Desenhos mecânicos de fabricação.



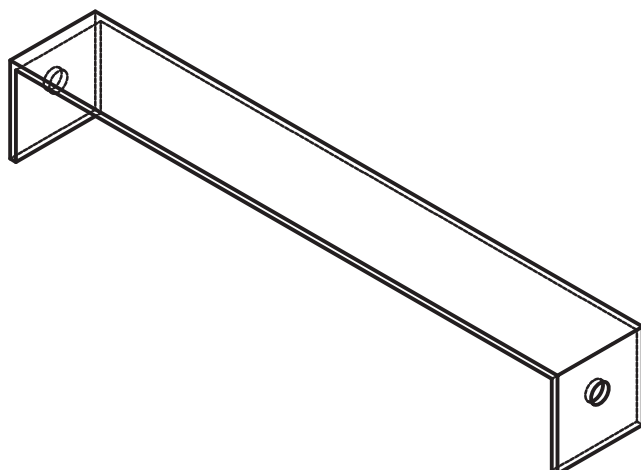
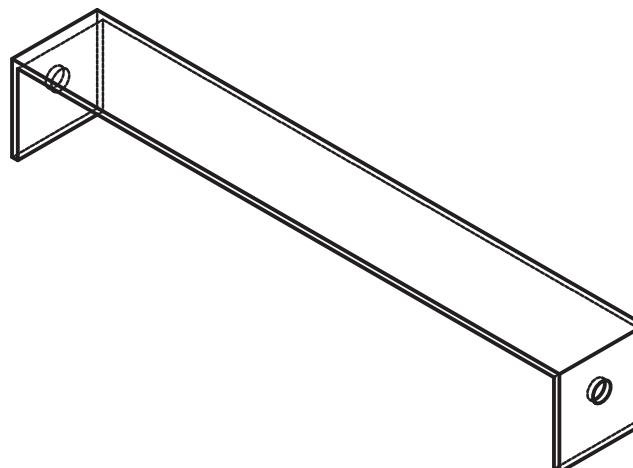
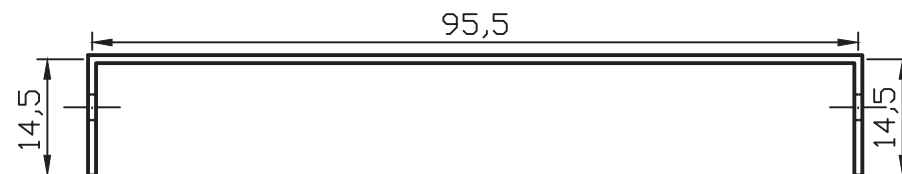
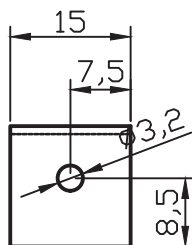
	Qntd.	Item
1	1	Estrutura de suporte da bateria

TÍTULO:	Apêndice D - 1 - Estrutura de suporte da bateria		AUTOR:	Dalton Ishizaki & Renan Dias	
MATERIAL:	Alumínio		ESCALA:	1:2	FOLHA: A4
OBSERVAÇÃO:	- Espessura de 1 mm - Todas as tolerâncias possuem medida de ± 0.1 mm em escala real				DATA: 04/11/2015



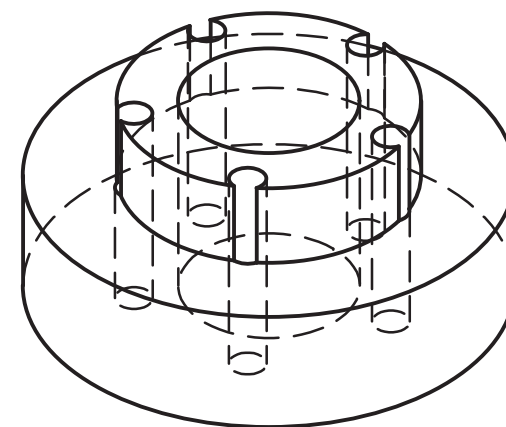
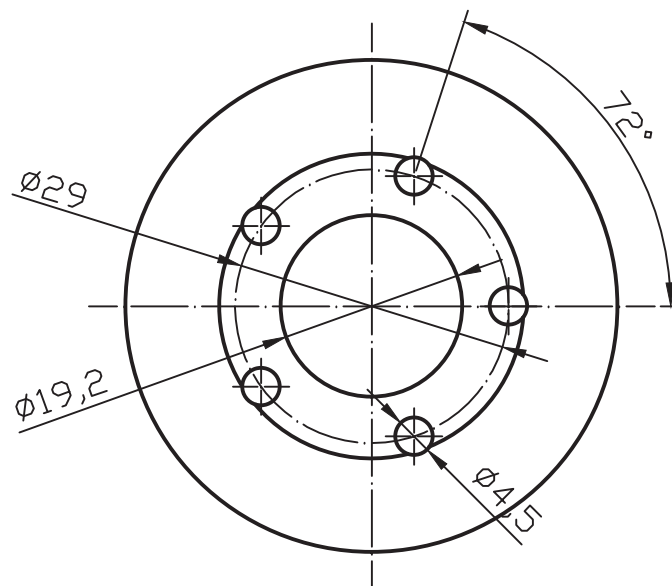
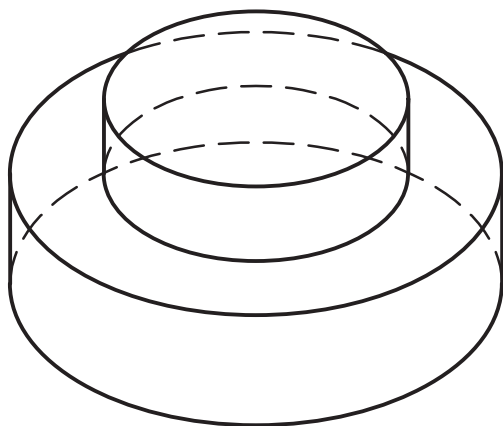
	Qntd.	Item
2	1	Estrutura de suporte do motor

TÍTULO:	Apêndice D - 2 - Estrutura de suporte do motor		ALUNO:	Dalton Ishizaki & Renan Dias	
MATERIAL:	Alumínio		ESCALA:	1:3	FOLHA: A4
OBSERVAÇÃO:	- Espessura de 1 mm - Todas as tolerâncias possuem medida de ± 1 mm em escala real				DATA: 07/11/2015



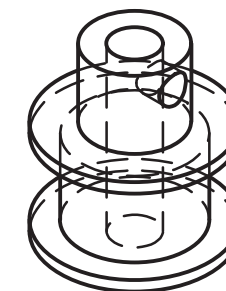
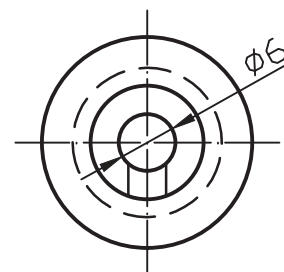
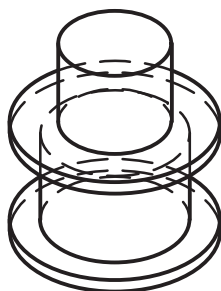
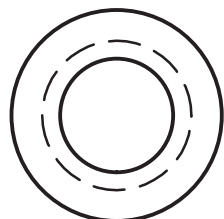
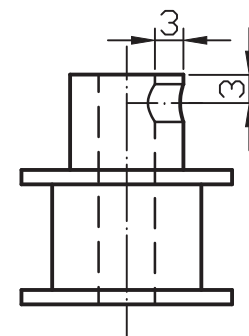
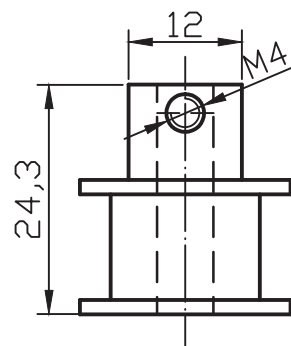
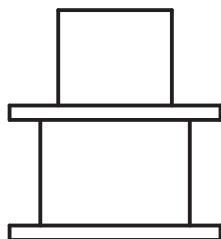
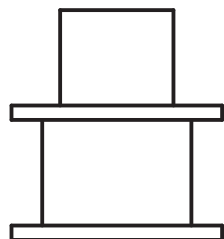
	Qntd.	Item
3	2	Estrutura de suporte auxiliar

TÍTULO:	Apêndice D - 3 - Estrutura de suporte auxiliar		ALUNO:	Dalton Ishizaki & Renan Dias	
MATERIAL:	Alumínio		ESCALA:	2:1	FOLHA: A4
OBSERVAÇÃO:	- Espessura de 1 mm - Todas as tolerâncias possuem medida de ± 1 mm em escala real			DATA:	07/11/2015



Qntd.	Item
1	Polia sincronizadora HTD 53 mm

TÍTULO:	Apêndice D - 2 - Polia sincronizadora HTD 53 mm		ALUNO:	Dalton Ishizaki & Renan Dias	
MATERIAL:	Alumínio		ESCALA:	2:1	FOLHA: A4
OBSERVAÇÃO:	- Todas as tolerâncias possuem medida de ± 0.1 mm em escala real				DATA: 25/10/2015



Qntd.	Item
1	Polia sincronizadora HTD 17 mm

TÍTULO:	Apêndice D - 3 - Polia sincronizadora HTD 17 mm	ALUNO:	Dalton Ishizaki & Renan Dias
MATERIAL:	Alumínio	ESCALA:	FOLHA:
		2:1	A4
OBSERVAÇÃO:	- Todas as tolerâncias possuem medida de ± 0.1 mm em escala real		DATA:
			25/10/2015