

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL HIROAKI MARQUES TANAKA

**PLATAFORMA DE CARRO ELÉTRICO EM ESCALA REDUZIDA
PARA ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE CONTROLES
ELETRÔNICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

RAFAEL HIROAKI MARQUES TANAKA

**PLATAFORMA DE CARRO ELÉTRICO EM ESCALA REDUZIDA
PARA ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE CONTROLES
ELETRÔNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz

CURITIBA
2019

Rafael Hiroaki Marques Tanaka

Plataforma de carro elétrico em escala reduzida para estudo e desenvolvimento de controles eletrônicos

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 09 de julho de 2019.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia elétrica

Profa. Annemarien Gehrke Castagna, Ma.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Dr. Guilherme Luiz Moritz
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Amauri Amorin Assef
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Ohara Keraususkas Rayel
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ao Profundo, Deus, fonte das realizações e a inspiração que alimenta a imaginação, move a criatividade e a liberdade de ser, amar e viver dignamente.

RESUMO

Tanaka, Rafael H. M. PLATAFORMA DE CARRO ELÉTRICO EM ESCALA REDUZIDA PARA ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE CONTROLES ELETRÔNICOS. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Este trabalho visa ao desenvolvimento de uma plataforma de estudo e aprimoramento de controles eletrônicos para veículos elétricos, utilizando como modelo um sistema em escala reduzida, controlado via rádio controle. Em consonância com os conceitos de carro elétrico e sistema autônomo, propõe-se também uma inovação tecnológica: utilizar um sistema composto por 4 motores elétricos que gerem tração independente em cada uma das 4 rodas. Com o objetivo de realizar um estudo eficiente e de baixo custo – para que possa instigar posteriores estudos e desenvolvimento – , em um primeiro momento buscou-se um embasamento teórico acerca do contexto histórico dos automóveis, para compreender as necessidades do mercado atual; também realizou-se um estudo acerca dos sistemas de automóveis e auto modelos; posteriormente, foi desenvolvido o projeto, buscando a melhor forma de aplicar os conhecimentos técnicos adquiridos no automodelo, de forma acessível; com isso, pôde-se confeccionar o protótipo, com diversas simulações de desenvolvimento do sistema embarcado e a realização da estrutura mecânica adaptada para receber os 4 motores; e, por fim, foi desenvolvido um controle eletrônico: o de tração. Nesta proposta, foi desafiador trabalhar quebrando um grande paradigma automobilístico: o de que um carro possui apenas um motor. Isso porque, no mercado, não há um padrão de peças para compor um sistema diferenciado, e a maior parte dos componentes deve ser adaptada. Porém, apesar da complexidade da parte mecânica do automodelo, concluiu-se que foi mais simples e eficiente desenvolver sistemas eletrônicos quando se tem tração independente nas quatro rodas.

Palavras-chave: Carro elétrico. Controles eletrônicos. Plataforma de estudo e desenvolvimento. Tração independente nas 4 rodas.

ABSTRACT

Tanaka, Rafael H. M. ELECTRIC CAR PLATFORM ON REDUCED SCALE FOR STUDY AND DEVELOPMENT OF ELECTRONIC CONTROLS. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

This Project aims to develop a study platform and improvement of electronic controls for electric vehicles, using a system on a reduced scale controlled by a radio control. In line with the concepts of electric car and autonomous system, it is also proposed a technological innovation: to use a system composed by 4 electric motors which will generate independent traction in each one of the 4 wheels. With the aim of realizing an efficient and low cost study – so it can instigate posterior studies and development – in the first moment a theoretical background was sought, to make possible understanding the actual needs; also, a study about the automobile and auto models systems was realized; posteriorly, the project itself was developed, searching for the best way to apply the technical knowledge acquired in the auto model, accessibly; finished it, it was possible to make the prototype, along with some simulations for the embedded system and the realization of the mechanic structure, adapted to receive the 4 motors; Lastly, an electronic control was developed: the traction control system. In this proposal, it was challenging to work by breaking a huge automotive paradigm: the one which says that one car must have only one motor. That because, in the Market, there are no parts pattern to make up a differentiated system, and most of the components had to be adapted. However, despite the complexity of the auto model's mechanic part, it was concluded that it was simpler and more efficient to develop electronic systems when there is independent traction in the four wheels.

Keywords: Electric car. Electronic control. Development platform. Independent traction in 4 wheels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Sistemas mecânicos de um automóvel	17
Figura 2	– Partes componentes de um automodelo elétrico	19
Figura 3	– Motor CC sem escovas	21
Figura 4	– Servo Motor	22
Figura 5	– Exemplo de controle de direção de um automodelo utilizando servo motor ...	22
Figura 6	– Canais de um rádio controle de 6 CH	23
Figura 7	– Kit de desenvolvimento Tiva C Series TM4C123G <i>LaunchPad</i>	26
Figura 8	– Diagrama de componentes do microcontrolador	26
Figura 9	– Exemplo de utilização do sensor de Efeito Hall	27
Figura 10	– Esquema do PID	28
Figura 11	– Diagrama de blocos da estrutura mecânica do kit 94107PRO	31
Figura 12	– Carro elétrico 94107PRO	32
Figura 13	– Carro elétrico 94107PRO sem a bolha de proteção	32
Figura 14	– Conjunto traseiro do diferencial mecânico e o sistema de amortecimento	33
Figura 15	– Diferencial mecânico internamente	34
Figura 16	– Compatibilidade de engrenagens	35
Figura 17	– Caixa de engrenagens com a tampa aberta	35
Figura 18	– Base de fixação da peça metálica	36
Figura 19	– Fixação dos motores	36
Figura 20	– Diagrama mecânico após adaptações da plataforma	37
Figura 21	– Diagrama de <i>Hardware</i>	39
Figura 22	– Motor <i>Brushless</i> A2212	40
Figura 23	– <i>ESC Simon Series Emax</i> de 30A	41
Figura 24	– Servo motor E6001	41
Figura 25	– Rádio controle <i>Fly Sky FS-T6</i>	42
Figura 26	– Bateria de 5200 mAh da marca " <i>POWER</i> "	43
Figura 27	– Simulação prévia do sistema eletrônico	45
Figura 28	– Diagrama do <i>Software</i>	47
Figura 29	– Suporte do motor em aço	49
Figura 30	– Fixação do suporte do motor	50
Figura 31	– Fixação do eixo na engrenagem	51
Figura 32	– Conjunto completo do sistema de transmissão	51
Figura 33	– Fixação do sensor de efeito Hall	52
Figura 34	– Placa de interface	53
Figura 35	– Ligação do ESC com o programador AVR	54
Figura 36	– Fluxograma de desenvolvimento do protótipo	54
Figura 37	– Mínimo sinal do PWM do motor	56
Figura 38	– Máximo sinal do PWM do motor	56
Figura 39	– Relação do sinal de rádio e o RPM real em rotação direta	57
Figura 40	– Relação do sinal de rádio e o RPM real em rotação inversa	58
Figura 41	– Reação do controle proporcional do PID	59
Figura 42	– Reação do controle proporcional integrativo do PID	60

Figura 43	–	Reação do controle proporcional derivativo do PID	61
Figura 44	–	Reação do controle proporcional integrativo derivativo do PID	62
Figura 45	–	Motor posicionado e conectado a transmissão	63
Figura 46	–	Protótipo completo	64

LISTA DE SIGLAS

AM	<i>Amplitude Modulation</i>
BEC	<i>Battery Eliminator Circuit</i>
CC	Corrente Contínua
CH	Canal
CI	Circuito Integrado
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i>
FCEM	Força Contraeletromotriz
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
KV	Relação entre RPM máxima e tensão de alimentação do motor
KT	Índice de torque específico do motor
LiPo	Lítio Polímero
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RPM	Rotação por minuto
RTOS	<i>Real Time Operation System</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.1.1 Delimitação do Tema	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISAS	13
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivos Gerais	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 JUSTIFICATIVA	14
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 FUNDAMENTOS DE UM AUTOMÓVEL	17
2.1.1 Motor/elétrica	17
2.1.2 Chassi	18
2.1.3 Carroceria	18
2.2 AUTOMODELISMO	19
2.3 MOTORES ELÉTRICOS	19
2.3.1 Motor CC sem escovas (<i>Brushless</i>)	20
2.4 ESC (<i>ELECTRONIC SPEED CONTROLLER</i>)	21
2.5 SERVO MOTOR	22
2.6 DIFERENCIAL MECÂNICO	23
2.7 RÁDIO CONTROLE E RECEPTOR	23
2.8 BATERIA LIPO (LÍTIO POLÍMERO)	24
2.8.1 Especificações da bateria	24
2.8.2 Segurança	25
2.9 MICROCONTROLADOR TM4C123G	25
2.10 SISTEMA OPERACIONAL FREE RTOS (<i>REAL TIME OPERATION SYSTEM</i>)	26
2.11 SENSOR DE EFEITO HALL	27
2.12 CONTROLE ELETRÔNICO PID	28
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	29
3.1 A ESTRUTURA MECÂNICA DO PROJETO	30
3.1.1 Modificações Mecânicas	33
3.2 A ESTRUTURA ELETRÔNICA DO PROJETO	38
3.2.1 <i>Hardware</i>	38
3.2.1.1 Motores elétricos	39
3.2.1.2 ESC (<i>Electronic Speed Control</i>)	40
3.2.1.3 Sistema de direção	41
3.2.1.4 Sistema de radiofrequência	42
3.2.1.5 Sistema de energia	42
3.2.1.6 Sensor de efeito Hall	43
3.2.1.7 Microcontrolador	43

3.2.2 <i>Software</i>	46
3.2.2.1 Recebimento de dados do receptor	47
3.2.2.2 Sinal do sensores de efeito Hall	47
3.2.2.3 Controle de RPM	48
3.2.2.4 Controle dos motores <i>Brushless</i>	48
3.2.2.5 Controle do servo motor	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 CONFECÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA	49
4.1.1 Confecção do suporte do motor	49
4.1.2 Adaptação do sistema de transmissão	50
4.1.3 Fixação dos sensores Hall	51
4.2 CONFECÇÃO DA ESTRUTURA ELETRÔNICA	52
4.2.1 Confecção da placa de interface	52
4.2.2 Reprogramação dos ESCs	53
4.3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO E REALIZAÇÃO DE TESTES	54
4.3.1 Desenvolvimento do PWM e dos <i>timers</i> utilizando uma placa de teste	55
4.3.2 Testes de sinais	55
4.3.3 Testes com os motores desconectados da transmissão	56
4.3.4 Desenvolvimento do sistema PID	57
4.3.4.1 Equações de conversão de unidade para o tratamento do controle PID	57
4.3.4.2 Sintonia do controlador PID	58
4.4 TESTES FINAIS DO PROJETO	62
4.4.1 Testes com os motores conectados a transmissão e rodas suspensas	62
4.4.2 Testes finais com sistema completo em solo	63
5 CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIAS	67
Apêndice A – LISTA DE MATERIAIS	69
Apêndice B – LISTA DE REQUISITOS	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

De início, cabe salientar que as tecnologias utilizadas em automóveis híbridos e elétricos não são inovações recentes, e sim, provenientes do século XIX: mais precisamente, correlacionando-se com a trajetória das baterias que surgiam (HOYER, 2008). A partir da década de 1880, na França, EUA e Reino Unido, a inovação trazida pelo belga Gaston Planté, mais precisamente em 1859 – a bateria de chumbo e ácido –, passou a ser utilizada na constituição de diversos veículos elétricos, assim como diversas outras como as de níquel-zinco e zinco-ar. Além desse quesito, também levou-se em conta outras duas tecnologias desenvolvidas entre 1890 e 1900: a frenagem regenerativa e o sistema híbrido gasolina-eletricidade. Considerando-se tais aspectos, pode-se entender o porquê de, já na virada do século XIX, o mercado automobilístico contar com três tecnologias: carros à gasolina, a vapor e elétricos (BARAN; LEGEY, 2011).

No início do século XX, já havia quatro mil automóveis registrados na cidade de Nova York de acordo com Struben e Sterman (2008), sendo 53% a vapor, 27% à gasolina e 20% elétricos. Entretanto, a predominância da gasolina se fez presente, já que, quando os carros elétricos atingiram seu ápice – 30 mil unidades –, a quantidade de automóveis à gasolina já era trinta vezes maior e, a partir de então, a trajetória dos carros elétricos seguiu em declínio. Vários fatores como a necessidade de percorrer distâncias longas, a descoberta de petróleo no Texas, a invenção da partida elétrica – que extinguiu a manivela antes utilizada – e o meio de produção Fordista, que fez com que o preço final dos carros à gasolina fosse a metade dos carros elétricos, interferiram em um percurso que tinha tudo para se tornar cada vez mais próspero.

Por conseguinte, os automóveis híbridos receberam a função de compensar a baixa eficiência das baterias dos puramente elétricos e também instigar melhorias na estrutura de distribuição da energia elétrica. Segundo Hoyer (2008), há registros de que, em 1903, foi criado um automóvel que apresentava as características de um híbrido em série, graças a um gerador elétrico alimentado por um pequeno motor de combustão interna e dois pequenos motores elétricos, que forneciam tração às rodas dianteiras. Outro modelo, que podia ser caracterizado como um híbrido em paralelo, possuía um motor de combustão interna que era

utilizado tanto para fornecer tração às rodas quanto para carregar uma bateria, enquanto o motor elétrico fornecia potência extra ao motor de combustão ou funcionava por si só, quando em trânsito lento. Até os anos 20, havia diversos modelos de híbridos à disposição em países como EUA, França e Canadá.

Apesar de, no início, poucas pessoas se aventurarem nas estradas interioranas, o sucesso do alto desempenho do motor a combustão, a propaganda boca a boca, a facilidade de distribuição de combustíveis líquidos e a segurança de ter auxílio para reparar os problemas relativamente simples do automóvel permitiram que a rede de gasolina se expandisse rapidamente. Entretanto, concomitantemente, poucos mecânicos compreendiam o funcionamento de motores elétricos e baterias que os equipavam, o que fazia com que não houvessem muitos investimentos em novas tecnologias na área.

Portanto, na atualidade, propõe-se uma abordagem mais prática, abrangente e acessível das tecnologias referentes aos veículos elétricos no Brasil e no mundo, e é este, pois, o objetivo deste projeto; tornar os estudos acerca do assunto menos complicados para que, futuramente, seja possível alcançar uma queda no custo de produção e manutenção de um veículo elétrico, e prosseguir buscando novas descobertas, ambicionando aumentar o número destes na malha urbana.

1.1.1 Delimitação do Tema

Neste trabalho, desenvolveu-se um protótipo de carro elétrico em escala reduzida, utilizando a configuração de tração - nas quatro rodas - gerada por quatro motores elétricos independentes. A escala é de 1:10, assim como a de automodelo popularmente conhecido como “carrinho de controle remoto”.

O controle dos motores é realizado por uma placa microcontrolada localizada dentro do veículo, que é acionada por um rádio controle. O sistema proposto pode ser reprogramado para estudo de sistemas de controle como diferencial eletrônico, controle de tração e outras funções.

A mecânica do protótipo ficou limitada a um chassi com sistema de amortecimento independente e um sistema de direção com cruzetas para tracionamento das rodas.

1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

No Brasil, existe uma crescente busca por segurança, que ganha força exponencialmente. A falta de sistemas que auxiliam motoristas a ter um maior controle do veículo é abordada em muitos artigos. A empresa LATINNCAP, por exemplo, que faz diversos testes de segurança em veículos, somente atribui 5 estrelas para aqueles que possuem o sistema de controle de estabilidade (LATINNCAP, 2018).

Tendo em vista a importância das pesquisas tecnológicas, é necessário construir uma plataforma acessível para desenvolvimento de sistemas de controle eletrônico. Este trabalho visa a facilitar e reduzir os custos de grandes projetos veiculares.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Gerais

Desenvolver uma plataforma de carro elétrico em escala reduzida, focando na utilização de um motor elétrico independente em cada roda acionado por uma placa controladora programável, com o objetivo de estudar ou desenvolver controles eletrônicos de carros elétricos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Buscando atingir o objetivo principal deste trabalho, alguns objetivos específicos são requeridos, entre eles:

- Investigar o funcionamento da mecânica e elétrica dos carros e dos automodelos em escala reduzida;
- Selecionar as partes mecânicas e elétricas mais relevantes que irão integrar o protótipo verificando a viabilidade do projeto;
- Desenvolver e construir o protótipo em escala reduzida, integrando o sistema eletro-mecânico final obtido;
- Desenvolver um programa utilizando sistema operacional em tempo real para controle do sistema;

- Estudar e desenvolver um controle eletrônico de tração para acionamento dos motores;
- Analisar resultados obtidos.

1.4 JUSTIFICATIVA

Para acompanhar o crescimento tecnológico mundial, novas tecnologias devem ser desenvolvidas constantemente. Mas poucas são as empresas ou instituições de ensino superior no Brasil que possuem uma estrutura financeira ideal para desenvolvimento de grandes projetos.

No ramo automobilístico, é primordial que os passageiros usufruam de segurança enquanto estiverem dirigindo seus carros em qualquer tipo de terreno e também que os carros sejam menos agressivos ao meio em que trafegam – tanto pela questão sonora quanto pela ambiental. Devido ao baixo custo de abastecimento, o melhor desempenho eletromecânico e a diminuição progressiva do custo de aquisição ocorrerá a inserção do carro elétrico nas cidades e os carros de motor à combustão interna perderão espaço no mercado, além de trazer inúmeros benefícios à sociedade.

Portanto, com maior desenvolvimento de carros elétricos, será possível reduzir consideravelmente o consumo de energia proveniente de recursos não renováveis como a gasolina e o diesel. Além disso, irá fomentar o estudo de baterias e geradores de energia elétrica.

Assim, procurou-se propor com esse trabalho benefícios relevantes que irão facilitar o estudo e desenvolvimento de tecnologias automotivas com baixo custo, para que a sociedade possa ter um futuro mais seguro e menos agressivo ao meio ambiente quando se trata do ramo automobilístico.

Além disso, a existência dessa plataforma de estudos é muito importante, pois esses sistemas de controle, como o de estabilidade e tração, são tópicos que vêm sendo objeto de estudo na comunidade científica.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os estudos para desenvolvimento do protótipo ocorreram respeitando certos procedimentos: inicialmente, fez-se um estudo, por meio de pesquisas e revisões bibliográficas, sobre a mecânica e elétrica dos carros em geral. Isso facilitou a seleção de quais itens foram essenciais para o projeto. Os objetos de pesquisa foram artigos, livros etc.; também

foi feito um estudo de projetos semelhantes, por meio da busca do que já existe com a finalidade de captar ideias e possíveis melhorias para aplicar no projeto.

Posteriormente realizou-se um estudo de mercado, onde buscou-se encontrar todas as peças necessárias para a construção do projeto e as possíveis adaptações que foram necessárias para aplicação dos motores elétricos. Nesta etapa, também foi feita a pesquisa de preços a fim de encontrar os melhores produtos em relação custo-benefício do mercado.

Após compradas todas as peças, foi iniciada a construção do protótipo. Nesta etapa, foi necessário analisar se todas as peças estavam em bom estado e corretamente acopladas com as demais peças. A parte elétrica também foi devidamente instalada e estudada.

Com a mecânica pronta, foi necessário desenvolver o *software* que é colocado na placa controladora, com a finalidade de receber os sinais do rádio controle, processar e enviar para o controlador de velocidade dos motores. E então foram realizados os testes, nos quais buscou-se os ajustes necessários.

Com a plataforma em perfeito funcionamento, foi desenvolvida e estudada uma aplicabilidade com fins demonstrativos, como é o caso do controle eletrônico de tração, que controla o torque nas rodas de forma eficiente e automatizada.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho irá seguir a estrutura estabelecida pelas normas metodológicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná e conterà os seguintes capítulos:

Capítulo 1 (Introdução) – Introduzir e contextualizar o estudo. Ele irá conter o tema com os objetivos e justificativas para o desenvolvimento do trabalho;

Capítulo 2 (Fundamentação Teórica) – Segue com uma revisão da literatura e um estudo completo do tema apresentado. Ele irá conter a base de pesquisa necessária para o desenvolvimento do projeto;

Capítulo 3 (Desenvolvimento do projeto) – Apresentação do projeto, com a modelagem do problema contendo todas as modificações necessárias para o desenvolvimento do protótipo e do sistema;

Capítulo 4 (Resultados e discussões) – Apresentação das etapas de montagem e desenvolvimento do protótipo, indicando as fixações das partes mecânicas e elétricas, além de dos ajustes feitos para melhorar o desempenho mecânico do projeto;

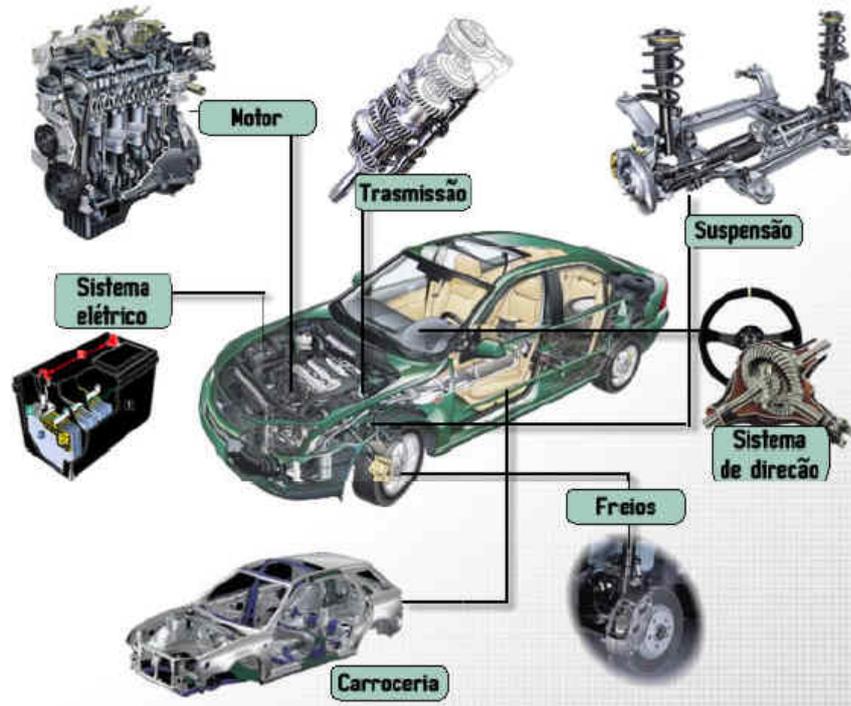
Capítulo 5 (Conclusão) – A conclusão e os conhecimentos obtidos no desenvolvimento e construção do projeto, além de sugestões para futuros projetos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FUNDAMENTOS DE UM AUTOMÓVEL

O automóvel é um veículo motorizado com quatro rodas muito utilizado para mobilidade de pessoas. Ele utiliza um sistema de propulsão que pode ser a combustão interna, elétrico ou híbrido, podendo ser dividido em três partes básicas: motor/elétrica, chassi (suspensão, freios e sistema de direção) e carroceria, visualizadas conforme a Figura 1 (GUTIERREZ; CARVALHO, 2013).

Figura 1 – Sistemas mecânicos de um automóvel



Fonte: Adaptado de FazerFacil.com (2018)

2.1.1 Motor/elétrica

O motor do carro é responsável por gerar a energia mecânica necessária para tracionamento das rodas. Entre eles, existem três tipos:

- Os de combustão interna, que geram energia mecânica a partir da queima de combustíveis

como a gasolina, álcool, diesel, entre outros, e que necessitam de um sistema de redução e troca de marchas;

- Os elétricos, que geram energia mecânica a partir de energia elétrica proveniente de uma bateria recarregável;
- Os carros híbridos, que utilizam o motor a combustão interna e o motor elétrico para integrar um sistema de potência em conjunto.

Além disso, faz-se necessário um sistema elétrico para controle do veículo, o qual é composto por uma bateria automotiva, responsável por fornecer energia para todo o sistema embarcado que visa a comandar o motor e os sistemas eletrônicos do automóvel.

2.1.2 Chassi

É a base rígida que contém os dispositivos que permitem a rolagem do veículo e o controle de seus movimentos. Eles podem ser divididos em sistemas de:

- Transmissão: responsável por transmitir a potência do motor para o conjunto de rodas. Nesse sistema inclui a embreagem, caixa de câmbio, sistema de diferencial mecânico entre outros;
- Suspensão: responsável por dar mais estabilidade ao automóvel. Ele absorve os impactos e faz o controle do balanço do veículo;
- Sistema de direção: responsável por controlar o eixo das rodas dianteiras, a fim de fazer o controle de direção do veículo;
- Freios: responsável por frear o veículo ou reduzir a velocidade.

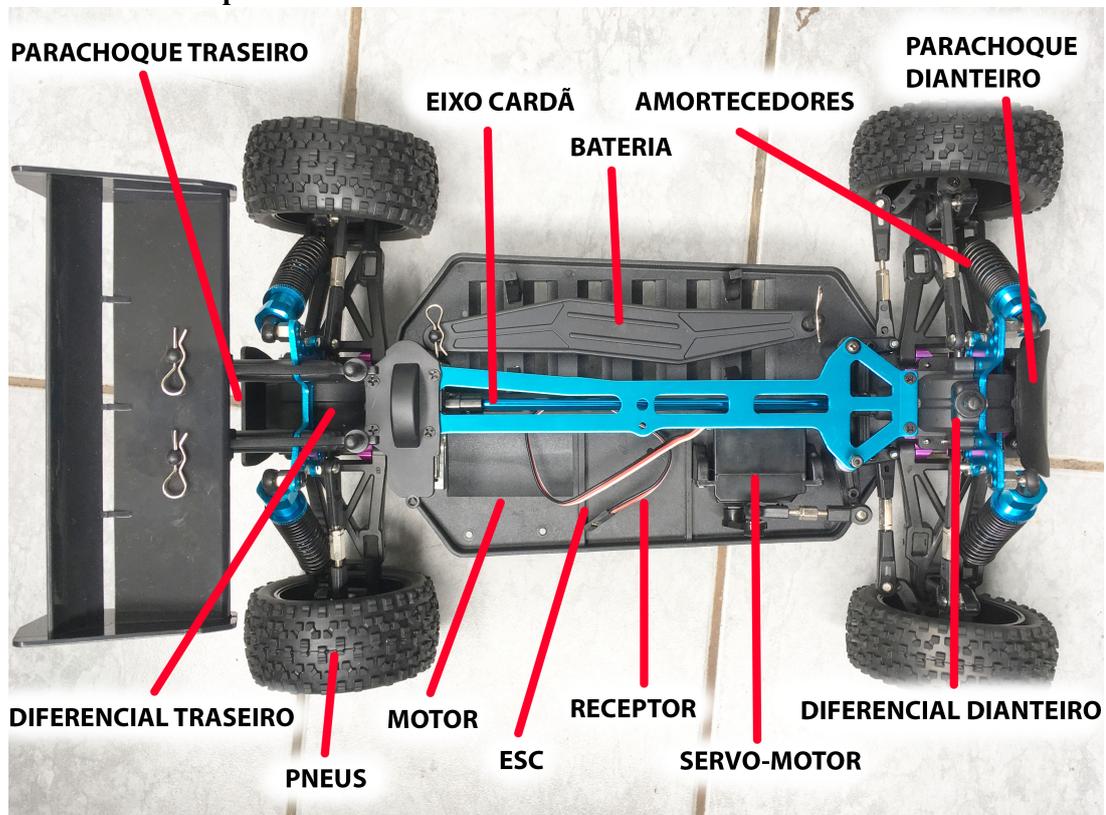
2.1.3 Carroceria

É a parte que envolve o veículo e define sua forma. Ela também é responsável pela estrutura do automóvel e a proteção dos passageiros. Normalmente é fabricada em um material de alta resistência mecânica, conforme mostrada na Figura 1.

2.2 AUTOMODELISMO

Automodelismo é a prática de modelismo em automóveis de controle remoto que podem ser de combustão interna ou elétrico. Os modelos mais comuns encontrados são os de escala 1:10 e 1:8. Eles possuem sistemas semelhantes aos encontrados em automóveis reais, como por exemplo o sistema de amortecimento e o de tração. Para o funcionamento destes automodelos, é necessário o uso de algumas peças fundamentais, conforme observado na Figura 2.

Figura 2 – Partes componentes de um automodelo elétrico



Fonte: Autoria própria

2.3 MOTORES ELÉTRICOS

Os motores são responsáveis pela transformação da energia elétrica em energia mecânica, que por sua vez gera rotação e torque nas rodas do carro. Porém, existem diversos tipos de motores presentes no mercado hoje em dia. No ramo do automodelismo, os motores mais comumente encontrados são os motores CC (corrente contínua) com escova (*Brushed*) e os motores CC sem escova (*Brushless*). Os motores *Brushed* são os mais simples e baratos encontrados no mercado, normalmente utilizados em aplicações de baixa potência. Entretanto,

neste projeto, foi requisitado um motor com maior potência para que os estudos fossem os mais realistas possíveis. Para isto, utilizou-se o motor do tipo CC *Brushless*, que possui maior torque e é facilmente encontrado no mercado.

2.3.1 Motor CC sem escovas (*Brushless*)

Os motores CC do tipo *Brushless* possuem ímãs permanentes no seu rotor e enrolamentos no estator como mostrado na Figura 3.

Esse motor não opera com um único sinal simples CC, mas sim com uma série de sequências de sinais periódicos, providos de uma fonte CC. Na topologia típica, eles possuem 3 fios, onde são acionados por sinais de controle aplicados em seus enrolamentos que geram um campo eletromagnético que ao interagir com o campo do ímã, gera rotação e torque no motor. Esses motores podem ser configurados em estrela ou triângulo. O tipo de configuração irá definir a sequência de comando que deverá existir para se realizar uma rotação no motor. A velocidade será controlada pela frequência dos sinais. Para isso, é utilizado um equipamento conhecido como ESC, que será explicado no tópico 2.4.

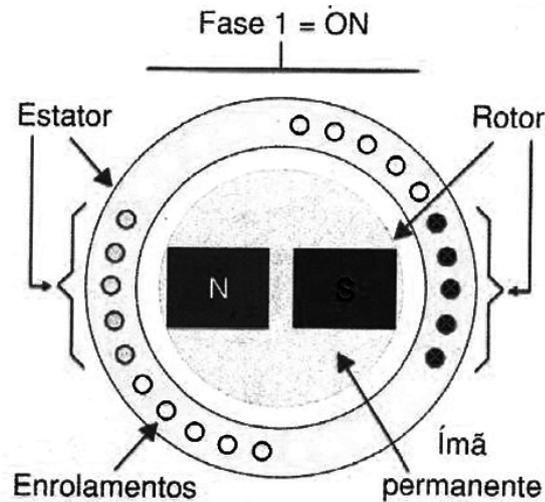
Os motores utilizam da nomenclatura KV, que estabelece uma relação entre RPM máxima e tensão de alimentação. O termo está relacionado a FCEM (força contraeletromotriz), que é proporcional ao número de voltas/espiras das bobinas e a força do campo magnético. Quanto mais espiras na bobina do estator e/ou mais intenso o campo magnético gerado pelo ímã do rotor, maior a FCEM e menor o KV. Isso faz com que o KV esteja relacionado inversamente com o torque do motor. Por exemplo, um motor com 1000 KV e tensão de alimentação de 10 V irá possuir uma rotação máxima de 10000 RPM. Já um motor com as mesmas características construtivas mas de 500 KV e tensão de alimentação de 10 V irá possuir uma rotação máxima de 5000 RPM, porém com o dobro do torque do motor de 1000 KV.

Os motores também possuem o índice KT, que representa o índice do torque específico. Ele é inversamente proporcional ao valor de KV. É possível encontrar o KT utilizando a seguinte equação:

$$K T = \frac{60}{2.\pi.K V} \quad (1)$$

Um motor com KV de 1000 terá um KT de 0,0095. Se ele apresentar uma corrente de 5 A, terá aproximadamente 0,0475 Nm (EPXX, 2017). Para o caso de um motor que não tem

Figura 3 – Motor CC sem escovas



Fonte: Adaptado de Braga (2014b)

torque o suficiente em um projeto, faz-se necessário um sistema de engrenagens para redução da velocidade e o aumento do torque.

2.4 ESC (*ELECTRONIC SPEED CONTROLLER*)

O ESC é um dispositivo usado para controlar a velocidade e a direção de rotação de um motor elétrico. Eles são normalmente encontrados em modelos controlados por rádio controle e que utilizam de um motor *brushless* de três fases. O ESC recebe um sinal em PWM (*pulse width modulation*) e em seguida aciona o motor proporcionalmente a este sinal, utilizando da potência da bateria que é conectada diretamente ao ESC (HOBBYKING, 2018).

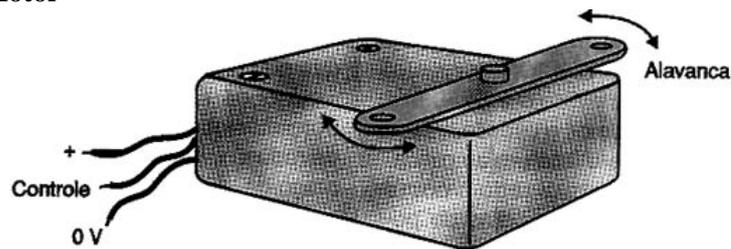
Alguns modelos de ESC apresentam vários sistemas de controle que podem ser programados. Um exemplo disso é a regeneração de bateria através da frenagem, que faz a recarga da bateria automaticamente enquanto o motor estiver em rotação, como no exemplo de um carro descendo uma ladeira.

Os ESCs também podem possuir um dispositivo denominado BEC (*Battery Eliminator Circuit*). Este dispositivo fornece a energia de baixa tensão, isolada dos motores, para os sistemas de controle e para o próprio ESC.

2.5 SERVO MOTOR

Os servo motores são dispositivos muito utilizados na robótica e no modelismo, pois funcionam com movimentos suaves e precisos. O tipo mais comum, encontrado no mercado, possui em seu interior um dispositivo de controle e um motor combinado com conjunto de engrenagens, que movimenta uma alavanca em seu exterior, conforme observado na Figura 4.

Figura 4 – Servo Motor

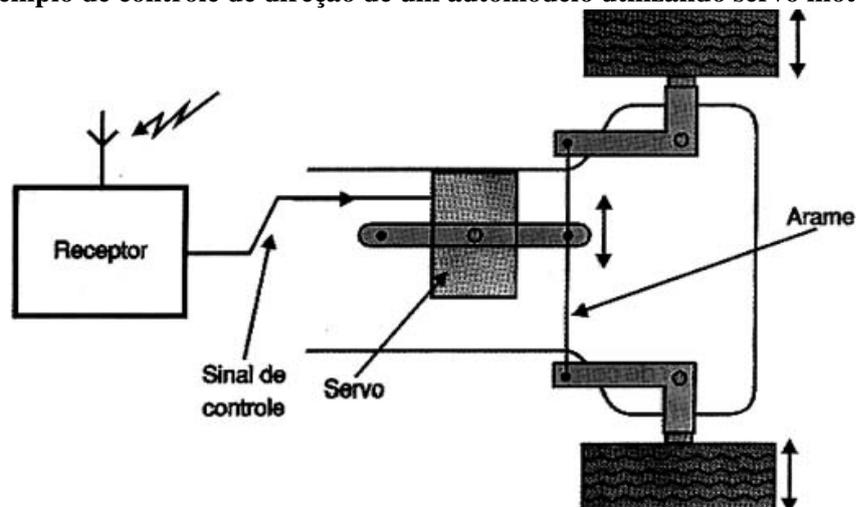


Fonte: Adaptado de Braga (2014a)

A partir de um sinal PWM injetado na entrada do controle, é possível mover a alavanca variando a tensão média do PWM, fazendo com que gire de -90° até $+90^\circ$, totalizando 180° .

Na aplicação deste projeto, o servo motor é utilizado para controlar a direção do carro. Existe uma alavanca fixada ao servo motor, que é ligada até a barra de direção por um arame rígido, que faz a movimentação do eixo das rodas frontais, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de controle de direção de um automodelo utilizando servo motor



Fonte: Adaptado de Braga (2014a)

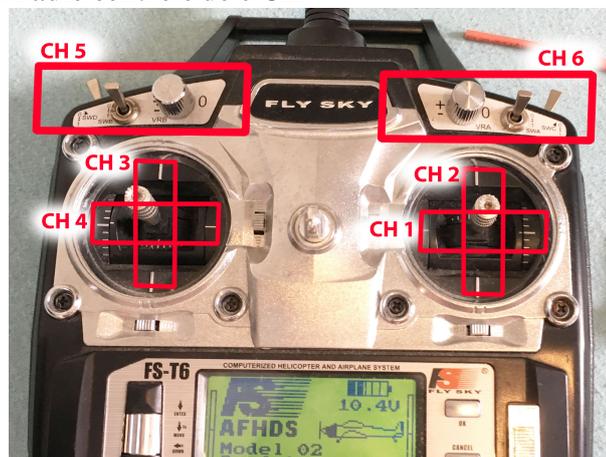
2.6 DIFERENCIAL MECÂNICO

É o conjunto de engrenagens que transmite a rotação do motor para as rodas. Durante uma curva, as rodas percorrem raios diferentes de curvatura que conseqüentemente vão ter diferentes rotações. Portanto, a sua principal função é transferir o torque, uniformemente e distribuído, para obter a melhor desempenho e estabilidade. Eles são encontrados no eixo frontal e no eixo traseiro.

2.7 RÁDIO CONTROLE E RECEPTOR

O rádio controle é utilizado em conjunto com o receptor para fazer o controle remoto de alguns dispositivos. Existem diversos tipos de rádio controle utilizados em aeromodelismo e automodelismo. Os mais comuns encontrados são os modelos de 6ch, os quais possuem 6 opções de comando para se controlar a distância. Os 4 primeiros canais são controlados por 4 eixos analógicos e 2 últimos canais controlados por chaves digitais e um potenciômetro, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Canais de um rádio controle de 6 CH



Fonte: Autoria própria

O sistema funciona da seguinte forma: com a utilização dos canais do rádio, é transmitido um sinal de frequência para um receptor o qual recebe o sinal e transmite via PWM para o carro. Antigamente, existiam cristais que controlavam a frequência do rádio controle, porém, era muito comum haver interferências. Costumava-se utilizar frequências entre 27 MHz e 72 MHz, as mesmas presentes nos rádios AM e FM.

Porém, atualmente, existe a tecnologia da transmissão em 2,4 GHz. Essa é a mesma frequência utilizada em aparelhos *wireless* e de rede sem fio. Entretanto, a grande vantagem é

que ela possui até 79 canais disponíveis para serem operados.

Na tecnologia 2,4 GHz, o rádio controle pode ser operado de duas formas escolhidas pelo fabricante. De acordo com Oliveira (2014), na opção FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) o sinal é difundido por uma sequência pseudoaleatória dentro dos 79 canais e fica se alterando a todo instante. Com o rádio e receptor em sincronismo, é possível ter a informação inteiramente recuperada. Já o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), conhecido também por pseudoruído, é o modo no qual o transmissor envia o sinal com adição de *bits* redundantes de dados. Dessa forma, o transmissor espalha os dados em diversos canais (reduzindo a potência e parecendo ruído para outros sistemas) e o receptor capta o sinal a partir do "código sequência" do transmissor (OLIVEIRA, 2014).

O alcance deste tipo de frequência pode chegar a até 900 m, porém irá depender também da antena do rádio. O consumo de energia é até 40% menor do que nos modelos antigos feitos com frequência AM/FM e o tempo de resposta é de 5,6 ms para o rádio de 2,4 GHz, contra 12 ms a 18 ms nos rádios AM/FM (OUTRC, 2011).

2.8 BATERIA LIPO (LÍTIO POLÍMERO)

A bateria é um dispositivo essencial em qualquer projeto eletrônico, já que é ela que irá fornecer energia para todo o sistema. Visto que existem diversos tipos de modelo de bateria, para esta aplicação, o modelo escolhido será do tipo lítio polímero, pois, além de o lítio ser o mais leve dos metais em número atômico, é muito bom para servir de ânodo devido ao seu potencial eletroquímico. Ele também pode ser um forte agente redutor e um fraco agente oxidante. Já o polímero serve como cátodo e é formado a base de cobalto, fosfato e manganês (STROSKI, 2017).

2.8.1 Especificações da bateria

As baterias LiPo possuem algumas especificações importantes a serem consideradas. Entre elas:

- Número de células (S): Cada célula de uma bateria LiPo é capaz de produzir uma tensão de 3,7 V. Com isso, as baterias podem ter várias células conectadas em série produzindo tensões de 2S (7,4 V) - 3S (11,1 V) - 4S (14,8 V) ou mais;
- Capacidade de carga (mAh): É a quantidade de carga que uma bateria pode armazenar.

Uma bateria com 3000 mAh terá capacidade de fornecer 3 A de corrente em 1 hora, ou 0,3 A em 10 horas;

- Taxa de descarga (C): A taxa de descarga é a quantidade máxima de corrente que uma bateria pode fornecer sem sofrer danos irreparáveis. Essa corrente é calculada pela fórmula:

$$A_{max} = TaxaDescarga(C) \cdot CapacidadeCarga(mAh) \quad (2)$$

Uma bateria com capacidade de carga de 3000 mAh e uma taxa de descarga de 10 C poderá fornecer uma corrente máxima de 30 A.

2.8.2 Segurança

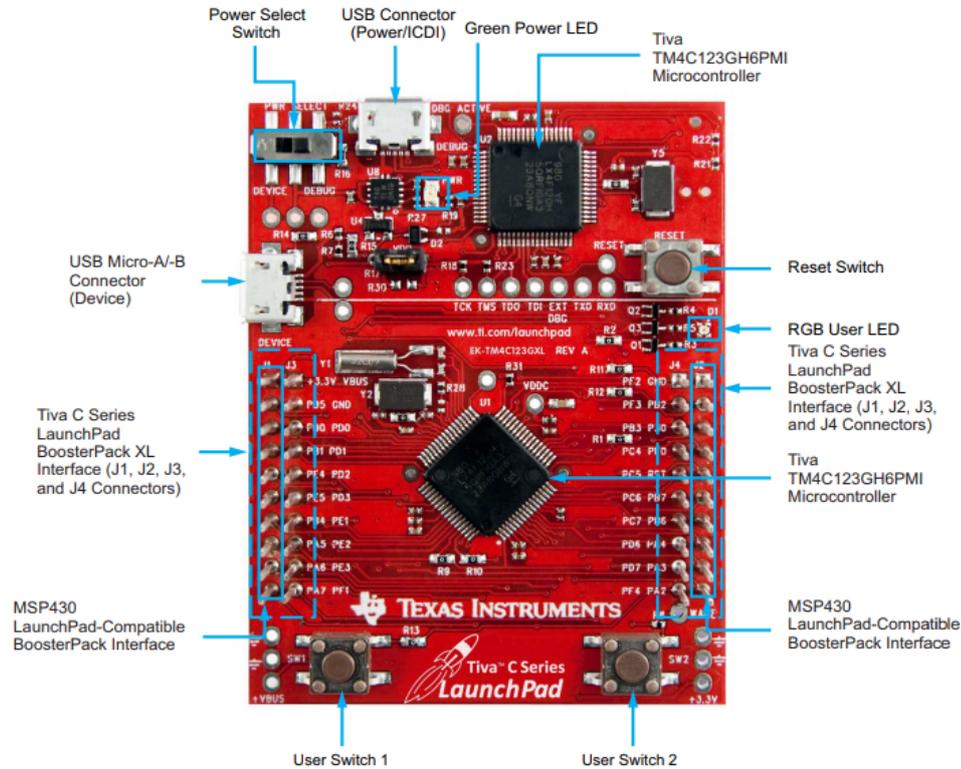
As baterias do tipo LiPo devem ser sempre carregadas com um carregador especial para baterias LiPo, já que as células precisam estar sempre funcionando com a mesma tensão. Portanto, o carregador tem a função de realizar o carregamento e o balanceamento das baterias. Além disso, essas baterias podem se incendiar se forem expostas a elevados níveis de tensão ou se o invólucro de proteção for rompido. Então, deve-se tomar muito cuidado com o manuseio e a utilização. Caso as células sejam mantidas abaixo de 3 V, poderá haver dano permanente.

2.9 MICROCONTROLADOR TM4C123G

O microcontrolador é um dispositivo responsável pelo processamento de dados e controles de um sistema embarcado. Eles são pequenos CI (Circuito Integrado) com bilhões de semicondutores capazes de realizar tarefas e processar diversos programas previamente programados. Os microcontroladores ARM-Cortex M4 possuem 32 bits com operação de até 80 MHz. Eles apresentam baixo consumo e são utilizados nos mais variados tipos de aplicação e projetos. O TM4C123G é encontrado no *kit* de desenvolvimento Tiva C *series LaunchPad*, uma placa de fácil uso criada pela Texas Instruments que possui alguns periféricos necessários para o funcionamento do microcontrolador, conforme apresentado na Figura 7.

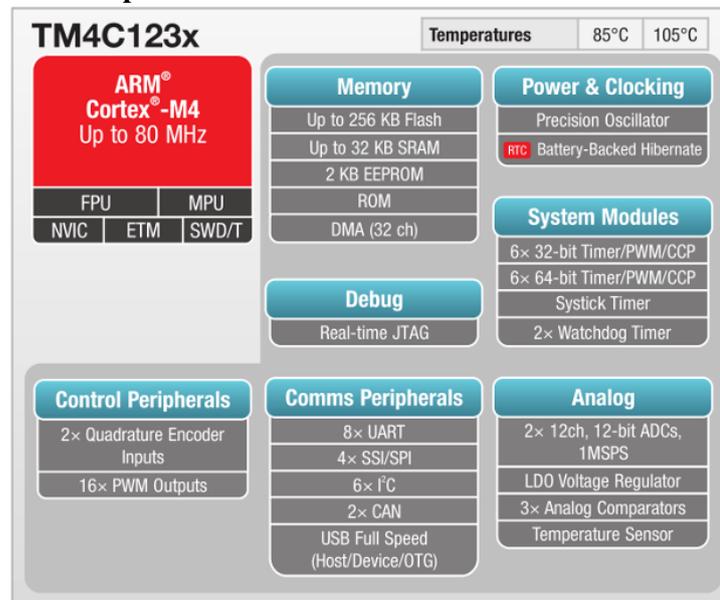
Este microcontrolador possui diversas características necessárias para o projeto. Uma delas é o conjunto de PWMs e temporizadores presentes, os quais são 16 portas possíveis no total. Outras características são observáveis na Figura 8.

Figura 7 – Kit de desenvolvimento Tiva C Series TM4C123G LaunchPad



Fonte: Adaptado de Instruments (2016)

Figura 8 – Diagrama de componentes do microcontrolador



Fonte: Adaptado de Instruments (2016)

2.10 SISTEMA OPERACIONAL FREE RTOS (REAL TIME OPERATION SYSTEM)

Um sistema operacional em tempo real (RTOS) é um *software* que faz o gerenciamento de recursos de um sistema computacional. Seu objetivo é garantir que todos os eventos sejam

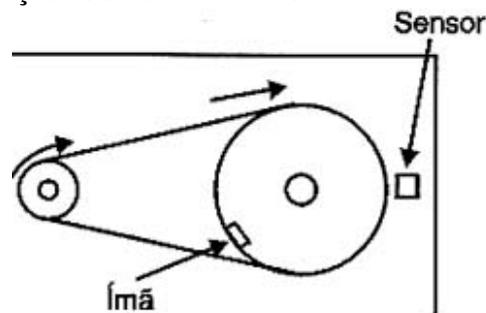
realizados dentro de suas restrições de tempo e gerenciamento de forma mais eficiente (MAIA, 2013). Neste projeto, é necessário este tipo de sistema uma vez que são vários os mecanismos funcionando de forma paralela, como exemplo, o acelerador deve sempre funcionar mesmo enquanto estiver sendo feita uma curva rotacionando as rodas frontais.

Já o FreeRTOS (2018) é um sistema operacional RTOS do tipo *software free*, que faz execução de multi-tarefas no qual o tempo de resposta é chamado de evento, ou seja, ele é capaz de executar todas as tarefas ao mesmo tempo utilizando apenas 1 processador. Na prática é impossível, porém como as tarefas ocorrem sequenciadas de forma rápida, torna-se o sistema imperceptível ao usuário com a impressão de estar rodando em paralelo (MAIA, 2013).

2.11 SENSOR DE EFEITO HALL

Os sensores de efeito Hall são sensores que identificam um campo magnético. Eles possuem um material semiconductor com propriedades elétricas que possibilitam a circulação de uma corrente elétrica com a distribuição uniforme dos portadores de carga no sentido paralelo à da corrente. No entanto, se houver a presença de um campo magnético externo atuando sobre este material, uma força perpendicular ao deslocamento das cargas vai fazer com que a distribuição das cargas seja modificada (Lei de Lorentz), interrompendo o fluxo de corrente e gerando uma diferença de potencial. Assim, será possível calcular a velocidade de rotação do motor, que possui internamente vários ímãs gerando campo magnético, conforme observado na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de utilização do sensor de Efeito Hall



Fonte: Adaptado de Braga (2015)

Como os dados recebidos pelo microcontrolador são do tipo digital simples, é preciso fazer a conversão para rotações por minuto (RPM). Com isso, o cálculo do RPM de um motor é feito utilizando a seguinte fórmula:

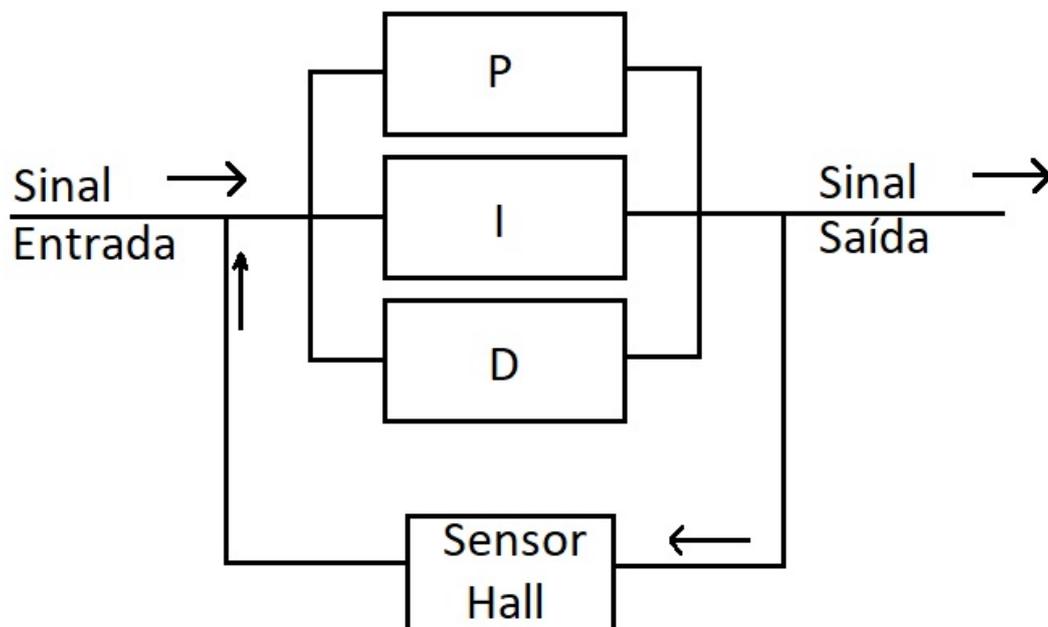
$$R_{RPM} = \frac{\text{Número de sinais recebidos}}{\text{Número de polos do motor}} \cdot \frac{120}{\text{Período de captação dos sinais}} \quad (3)$$

2.12 CONTROLE ELETRÔNICO PID

De fato, o controle eletrônico PID é um sistema muito utilizado para automação industrial, e uma de suas principais funções está relacionada ao controle de rotação de motores elétricos que buscam o melhor desempenho possível. O PID é um controlador que atua derivando e integrando possíveis erros para, em resposta, obter um valor ideal para o desenvolvimento da tração do sistema. Cabe salientar que esse tipo de controlador apenas funciona em malha fechada, o que significa que faz-se necessário também um sensor para monitorar suas atividades e trabalhar empregando os valores encontrados.

Neste projeto, o controlador PID tem a função de atuar no controle de tração, para evitar derrapagens e fornecer maior controle com relação à rotação do automodelo. No sistema, há uma placa que roteará os sinais de acionamento através do PID. O *feedback* de cada roda é realizado pelo sensor de efeito Hall. Isso pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Esquema do PID



Fonte: Autoria própria.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Atualmente, a maioria dos carros reais possuem apenas um motor, o que não possibilita o controle individual nas quatro rodas – sendo o freio a única forma de controle; já neste projeto, foram utilizados os quatro motores que tornarão viável o controle total de cada roda, objetivando ganhar em eficiência e segurança. Se for possível acelerar em vez de frear, por exemplo: com o controle de cada roda, permite-se que as rotações sejam diferentes e, conseqüentemente, que uma curva seja executada com mais estabilidade e segurança. Além disso, o diferencial ajustável permite que se tenha total controle sobre o automóvel.

A ideia do projeto é desenvolver uma plataforma educacional de estudos de sistemas de controle automotivo de baixo custo na forma de um carro de controle remoto adaptado e automatizado com quatro motores. Tendo em vista que um carro elétrico em escala real exigiria um gasto exorbitante e geraria uma dificuldade muito grande, buscou-se uma alternativa – um projeto de menor custo que possa ser utilizado em posteriores projetos educacionais.

O primeiro passo foi a compra do automodelo: foi realizada uma pesquisa de preços e concluiu-se que comprar peças independentes exigiria muito mais custo, além de que a maioria delas não é compatível com a outra. Portanto, foi preferível a compra de uma estrutura pré montada, e um *kit* mecânico de automodelo foi a solução. Entretanto, o modelo é naturalmente desenvolvido para um motor apenas e, segundo a intenção do projeto, a ideia principal consiste em um sistema com quatro motores. Logo, foram realizadas as devidas adaptações. O carrinho pode aparentar ser comum, mas contará com vários controles eletrônicos desenvolvidos em um sistema embarcado.

Neste projeto, o tipo de controle desenvolvido foi o controle eletrônico de tração – o sistema PID foi responsável pelo controle de derrapagem a partir de um comando do piloto juntamente com um *feedback* de rotação através de um sensor de efeito Hall instalado em cada motor.

Além desse tipo de controle, a plataforma possibilita os estudos posteriores e o desenvolvimento de novos controles como o diferencial eletrônico e o controle anti-colisão, graças ao microcontrolador nele embutido.

O desenvolvimento do projeto foi dividido em duas partes, a estrutura mecânica e a

estrutura elétrica. Posteriormente foi feito a junção eletro-mecânica para finalizar o projeto. Foram montadas algumas tabelas de requisito que estará dividida entre as seções e também poderá ser analisada no APÊNDICE B de forma completa.

3.1 A ESTRUTURA MECÂNICA DO PROJETO

Para que o estudo mecânico ocorra com a maior precisão e a maior proximidade da realidade, é necessário um protótipo que se aproxime de um modelo real de automóvel. Então foi montada uma tabela de requisitos necessário para o sistema mecânico:

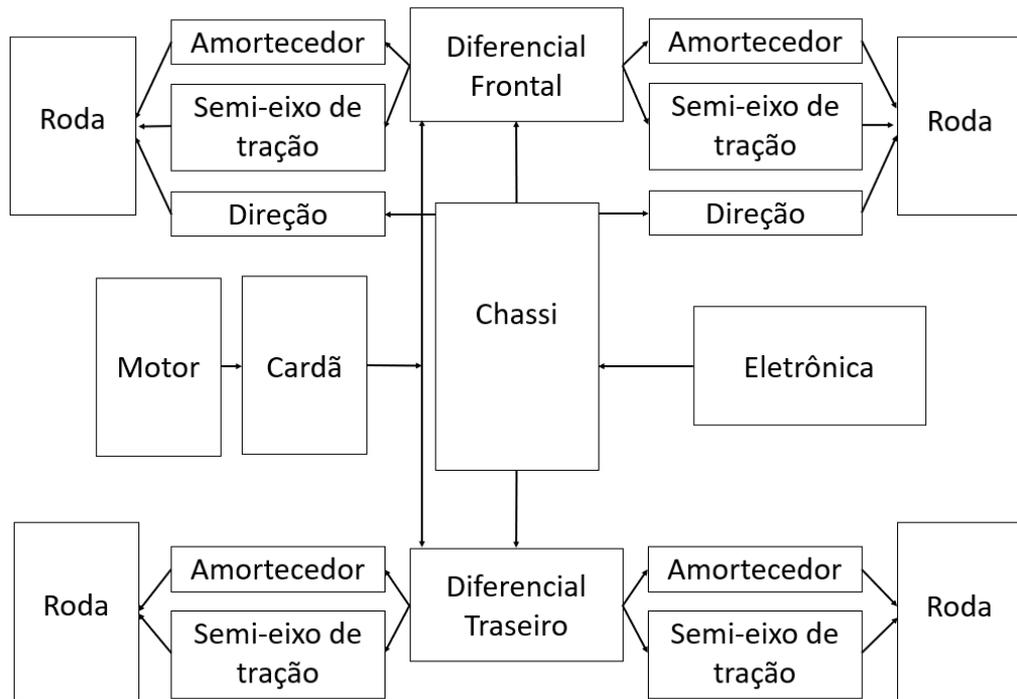
Tabela 1 – Requisitos mecânicos

Descrição	Requisito
RE_MC_01	O carro deve conter 4 rodas
RE_MC_02	O carro deve conter um sistema independente de amortecimento
RE_MC_03	O carro deve conter um sistema de direção
RE_MC_04	O carro deve conter um chassi para apoio dos sistemas
RE_MC_05	O carro deve conter tração independente nas 4 rodas, sendo cada uma controlada por 1 motor
RE_MC_06	O carro deve conter espaço para acoplamento do sistema eletrônico
RE_MC_07	O carro deve conter um sistema de proteção contra impactos

Fonte: Autoria própria.

Analisando o mercado e as possibilidades disponíveis, chegou-se a conclusão que a forma mais viável seria a aquisição de um *kit* de automodelo completo, devido aos custos mais baixos. Portanto, o modelo escolhido para integrar o projeto foi o 94107PRO, um carro elétrico, *Off-Road, Buggy*, 4x4 e de escala 1:10. Para o estudo do modelo, foi montado um diagrama de blocos contendo toda a estrutura mecânica do *kit*, visualizado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de blocos da estrutura mecânica do kit 94107PRO



Fonte: Autoria própria.

O *kit* 94107PRO, conforme a Figura 12, possui uma estrutura completa e pronta para ser montada, contendo:

1. Um chassi de plástico, para suportar as demais peças do conjunto;
2. Quatro sistemas de amortecedores independentes em alumínio, para absorver os impactos e garantir uma melhor estabilidade;
3. Dois sistema de diferencial mecânico, frontal e traseiro, para distribuição uniforme de potência para as rodas;
4. Um sistema de eixo cardã para tracionamento das 4 rodas;
5. Um sistema mecânico de direção das rodas frontais;

Além disso, ele conta com o conjunto de semi-eixos para transferência de potência do diferencial mecânico para as rodas e um sistema de acoplamento do motor ao eixo cardã, conforme observado na Figura 13.

Também foram adquiridas algumas peças extras como uma bolha de proteção, sistema de aerofólios para melhorar a estabilidade e um conjunto de para-choques.

Figura 12 – Carro elétrico 94107PRO



Fonte: Autoria própria.

Figura 13 – Carro elétrico 94107PRO sem a bolha de proteção



Fonte: Autoria própria.

3.1.1 Modificações Mecânicas

Para atender todos os requisitos do projeto mecânico, foi necessário realizar algumas adaptações no modelo do carro escolhido. Como o *kit* já possui 4 rodas, sistema de amortecedor independente, sistema de direção e um chassi, os requisitos RE_MC_01, RE_MC_02, RE_MC_03 e RE_MC_04, da Tabela 6, já estão sendo cumpridos, porém os demais precisarão de modificações.

Para cumprir o requisito RE_MC_05 da Tabela 6, foi preciso remover o diferencial mecânico frontal e traseiro e posteriormente inserir um sistema mecânico para tracionamento das rodas de forma independente. Porém, a caixa do diferencial suporta algumas peças importantes do carro, conforme mostrado na Figura 14. Entre elas:

1. Torre do amortecedor;
2. Braço superior do amortecedor;
3. Eixo de tração das rodas;
4. Barra de proteção do eixo cardã.

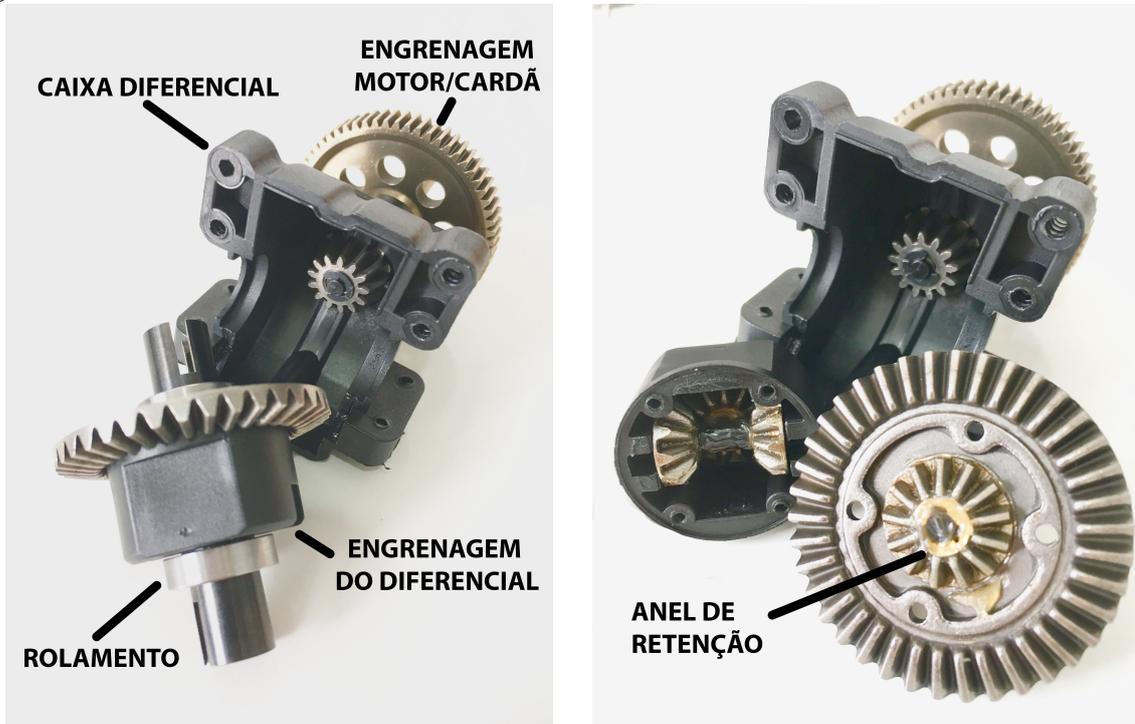
Figura 14 – Conjunto traseiro do diferencial mecânico e o sistema de amortecimento



Fonte: Autoria própria.

Por esse motivo, foi feito um estudo para adaptar a caixa do diferencial de forma que sua estrutura não fosse comprometida. Conforme observado na Figura 15, foi constatado que o diferencial independe da caixa externa, pois ele é completamente desacoplável.

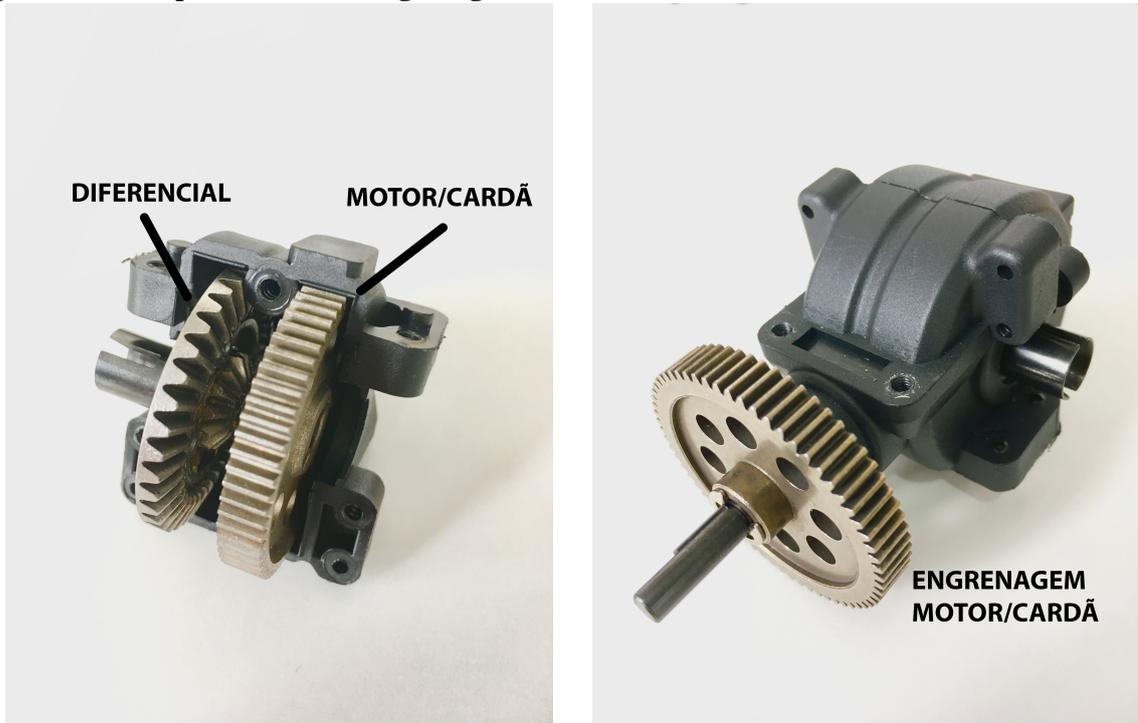
Figura 15 – Diferencial mecânico internamente



Fonte: Autoria própria.

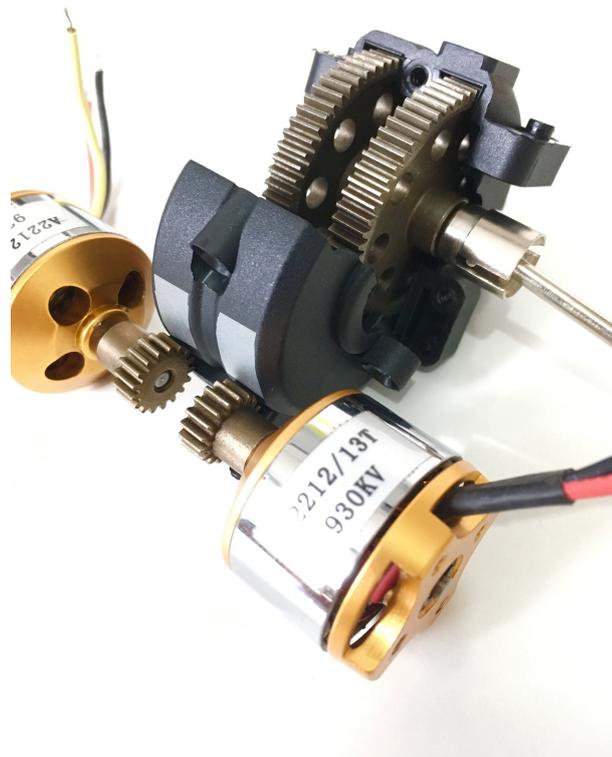
Logo, a melhor forma encontrada para solucionar este problema foi remover as engrenagens do diferencial e realocando o espaço para encaixar duas engrenagens iguais as que são utilizadas para tração motor/cardã do *kit*. Isso foi possível uma vez que a engrenagem externa do diferencial possui o mesmo diâmetro que a engrenagem do motor/cardã, conforme observado na Figura 16. E para que as engrenagens fiquem bem apoiadas, livres no interior da caixa e que possam tracionar os semi-eixos, foi inserido o mesmo eixo das engrenagens do diferencial, que são travadas por um anel de retenção. Dessa forma, os rolamentos tiveram um encaixe perfeito e foi possível fechar a caixa. Além disso, foram feitas duas aberturas na parte externa à caixa do diferencial, apenas para que a engrenagem fixadas no eixo do motor possa ser acoplada as engrenagens internas, conforme mostrada na Figura 17.

Figura 16 – Compatibilidade de engrenagens



Fonte: Autoria própria.

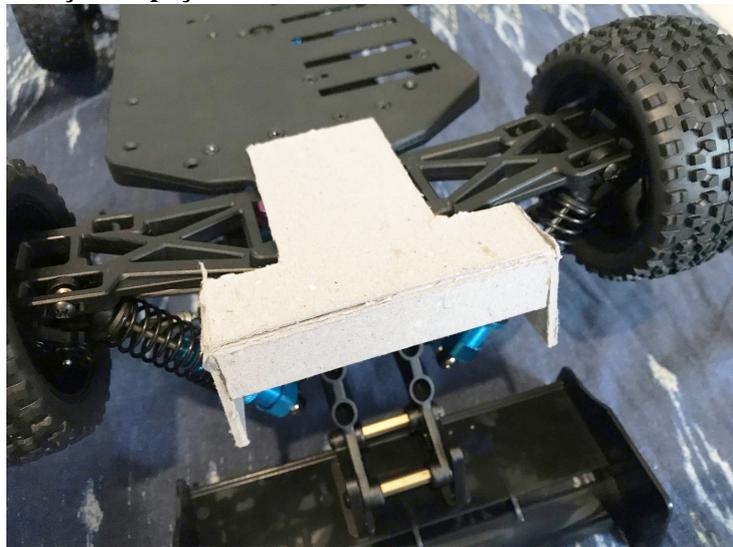
Figura 17 – Caixa de engrenagens com a tampa aberta



Fonte: Autoria própria.

Para finalizar, os motores foram fixados na parte externa ao carro. Isso foi necessário uma vez que na parte interna não há espaço suficiente já que possui o sistema de direção e os braços do amortecedor. Portanto, uma peça feita em alumínio foi confeccionada de forma que foi parafusada na parte de baixo do chassi junto aos parafusos de fixação do diferencial (4 parafusos), conforme observada na Figura 18, onde foi realizada uma simulação. A fixação dos motores foram feitas na peça metálica. Conforme observado na Figura 19, em que foi feita uma simulação utilizando papel Paraná, há espaço suficiente para fazer a fixação do motor sem atrapalhar a suspensão.

Figura 18 – Base de fixação da peça metálica



Fonte: Aatoria própria.

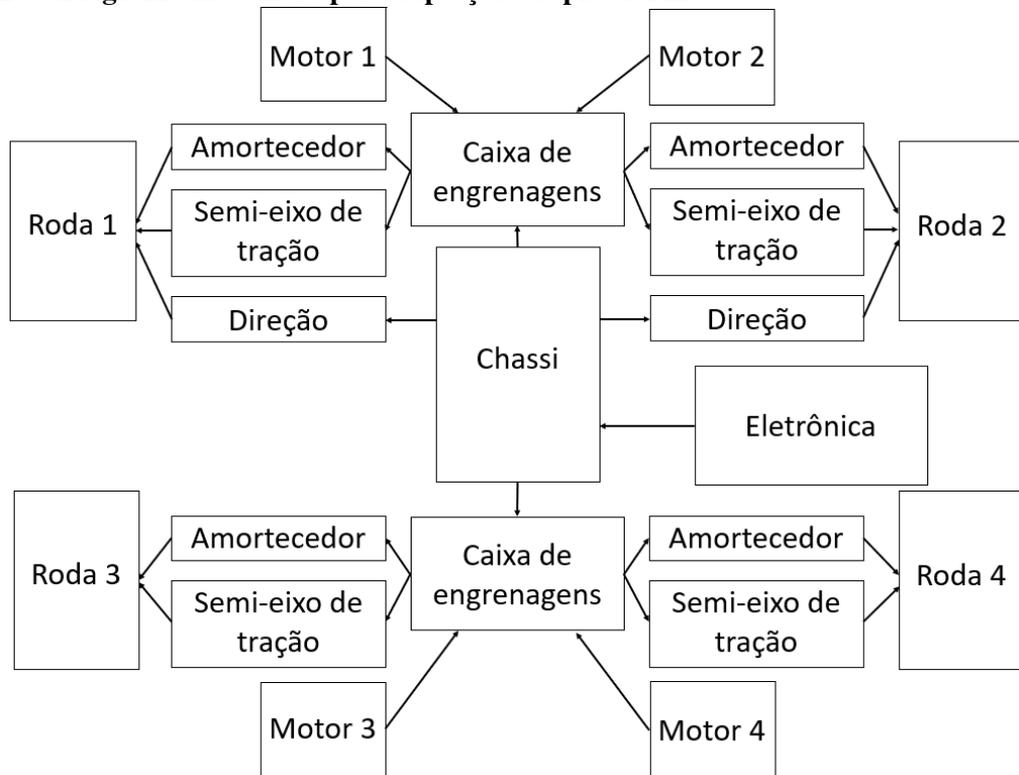
Figura 19 – Fixação dos motores



Fonte: Aatoria própria.

Essas modificações fazem com que o sistema cumpra o requisito RE_MC_05 da Tabela 6. A partir disso, fez-se um novo diagrama mecânico conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama mecânico após adaptações da plataforma



Fonte: Autoria própria.

Para cumprir com o requisito RE_MC_06 da Tabela 6, foi removido o eixo cardã. Dessa forma, o chassi fica aberto para alocar as peças eletrônicas. Já o sistema de fixação, este foi feito por abraçadeiras de *Nylon*.

E para cumprir com o requisito RE_MC_07 da Tabela 6, foi comprada uma bolha para proteger os sistemas eletrônicos internos, observado na Figura 12. Além disso, o suporte do motor que foi confeccionado funcionará também como para-choques.

3.2 A ESTRUTURA ELETRÔNICA DO PROJETO

Para a realização do estudo do projeto, foi necessário o desenvolvimento de um sistema embarcado que contem todas as instruções a fim de que o carro possa realizar atividades controladas por um rádio controle e com um sistema autônomo de controles eletrônicos. Além disso, foi preciso definir um conjunto de dispositivos para que fosse realizada a interface física e digital.

Para a melhor compreensão do projeto, este sistema foi dividido em duas partes: a estrutura de *Hardware* e a estrutura de *Software* que serão apresentados nesta secção.

3.2.1 *Hardware*

Para o estudo dos sistemas eletrônicos, foi desenvolvida uma tabela contendo os requisitos de *Hardware*:

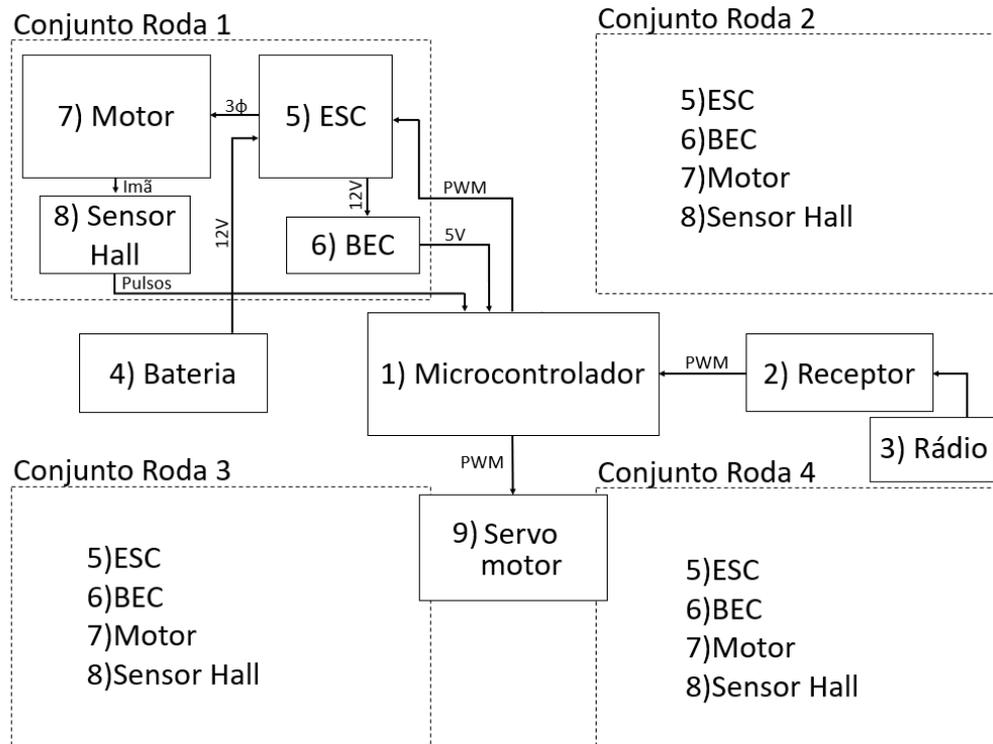
Tabela 2 – Requisitos de *Hardware*

Descrição	Requisito
RE_HW_01	O carro deve possuir 4 motores elétricos
RE_HW_02	O carro deve possuir 4 dispositivos de controle eletrônico de velocidade (ESC) com rotação bidirecional
RE_HW_03	O carro deve possuir um dispositivo eletrônico capaz de direcionar as rodas frontais
RE_HW_04	O carro deve ser controlado por um sistema de rádio controle
RE_HW_05	O carro deve conter um sistema de baterias para alimentar o motor e os sistemas eletrônicos
RE_HW_06	O carro deve conter um conjunto de sensores para medir a rotação real dos motores
RE_HW_07	O carro deve conter dispositivo de controle - microcontrolador - responsável por processar todos os dados

Fonte: Autoria própria.

Para cumprir com esses requisitos de *Hardware*, foi desenvolvido um diagrama de blocos que contém todos os dispositivos eletrônicos que estarão presentes no projeto. Esse diagrama de blocos pode ser visualizado na Figura 21.

Figura 21 – Diagrama de Hardware



Fonte: Autoria própria.

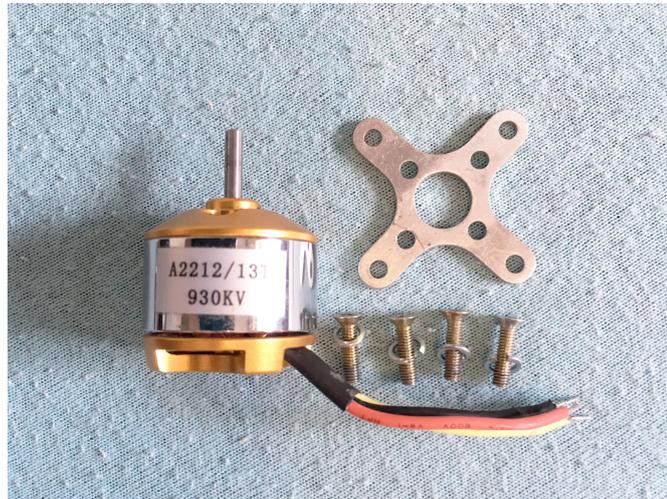
Esse diagrama foi feito buscando simular a construção física das posições de cada sistema. Além disso, para facilitar a visualização, o conjunto de roda 2, 3 e 4 são igualmente representados no conjunto de roda 1.

3.2.1.1 Motores elétricos

Para atender o requisito RE_HW_01 da Tabela 7, foi escolhido para esse projeto o motor do tipo *Brushless* A2212 de 930 KV, conforme apresentado na Figura 22. Esse motor, que possui 14 polos, irá desenvolver uma rotação de 11160 RPM se operado a 12 V. Por este motivo, é necessário uma redução de rotação para evitar uma corrente elevada de partida. Então neste projeto será utilizado um conjunto de engrenagens de relação 1:10, que também irá fazer transmissão de potência para o semi-eixo da roda. A rotação máxima final será de 1116 RPM na roda.

Conforme observado na Figura 21, o motor elétrico (7) terá a velocidade controlada pelo ESC (5) (*Electronic Speed Control*) e pelo sensor Hall (8) através de um sistema PID detalhado na seção 3.2.2.4.

Figura 22 – Motor *Brushless* A2212



Fonte: Autoria própria

3.2.1.2 ESC (*Eletronic Speed Control*)

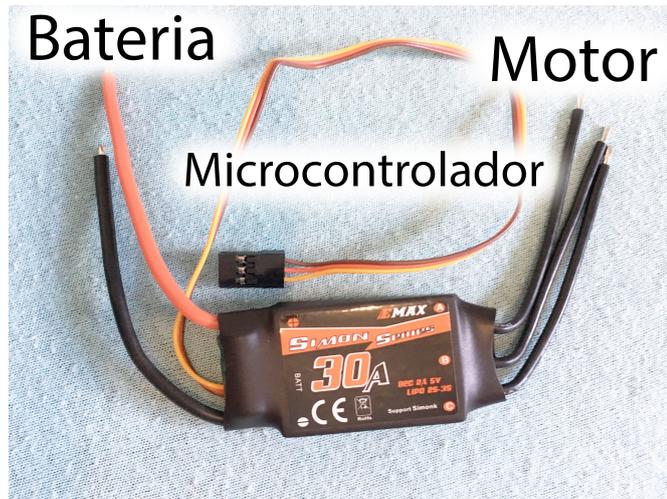
Para atender o requisito RE_HW_02 da Tabela 7, foi escolhido o ESC *Simon Series Emax* de corrente máxima de 30 A conforme apresentado na Figura 23. Ele já possui uma programação interna que faz o controle de fases e o sistema de potência do motor *Brushless*. Porém, será preciso fazer uma reprogramação para aceitar rotação inversa (marcha ré).

A reprogramação do ESC é feita por um programador AVR que é conectado no microcontrolador interno do ESC e conectado via porta USB de um computador. A conexão no ESC é feita abrindo a capa de proteção e soldando 4 fios no microcontrolador (pinos de programação). Após feito isso, será instalado o programa BLHeli (2018) no computador e feito ajuste de bi-direção de rotação. Então o programa reinstala o *firmware* adicionando o sistema bidirecional de rotação. Para finalizar, são removido os cabos de gravação e fechado o ESC com uma capa termo-retrátil.

Para a conexão do ESC com os demais sistemas, são utilizados conectores que fazem a ligação dos fios, conforme descrito na Figura 23.

Conforme a Figura 21, o ESC (5) será o responsável alimentar e por controlar a rotação do motor (7) a partir do sinal PWM recebido do microcontrolador (1). Além disso, será responsável por receber a energia da bateria (4) e alimentar o BEC (6) que gera os 5 V isolados necessários para alimentar os dispositivos eletrônicos.

Figura 23 – ESC Simon Series Emax de 30A



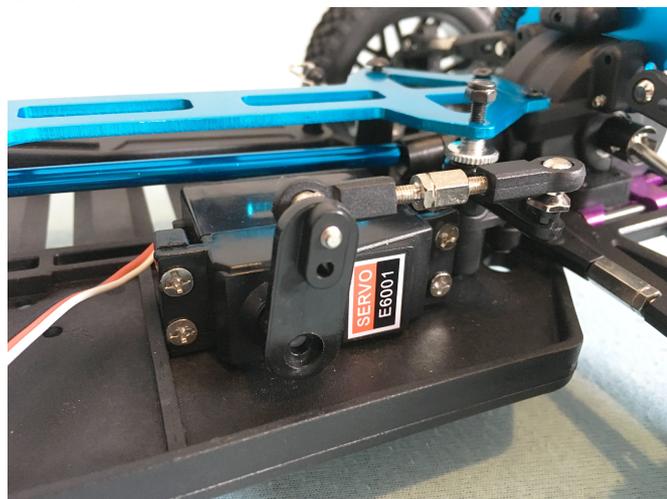
Fonte: Autoria própria

3.2.1.3 Sistema de direção

Para atender o requisito RE_HW_03 da Tabela 7, o sistema de direção é composto por um servo motor conectado fisicamente ao eixo de rotação das rodas frontais por uma haste mecânica. O sistema é possível de ser visualizado no exemplo da Figura 5.

O servo motor utilizado é o E6001 que é o modelo utilizado no carro 94107PRO. É um servo de 6 Kg.cm de torque e que opera entre 4,8 V a 6 V. Além disso, ele acompanha o braço de servo responsável pela transferência do movimento para o eixo das rodas frontais. Na Figura 24 é possível observar o sistema de fixação do servo no chassi e da direção.

Figura 24 – Servo motor E6001



Fonte: Autoria própria

Conforme a Figura 21, o servo motor (9) recebe um sinal do tipo PWM do

microcontrolador (1) que foi calculado em função do sinal de direção recebido por um canal do receptor (2) transmitido por rádio frequência do rádio (3).

3.2.1.4 Sistema de radiofrequência

Para atender o requisito RE_HW_04 da Tabela 7, foi utilizado um sistema de rádio-frequência que é composto por um rádio controle e um receptor. O rádio controle escolhido para esse projeto foi o modelo FS-T6 de 6 canais da marca *Fly Sky*, mostrado na Figura 25. O rádio acompanha o receptor de 6 canais.

Figura 25 – Rádio controle *Fly Sky* FS-T6



Fonte: Autoria própria

O rádio foi programado para que o canal 3 seja utilizado como acelerador, o canal 1 como controlador de direção do carro e o canal 5 como sistema de marcha ré. Os demais controles serão programados posteriormente.

Conforme a Figura 21, o rádio (3) possui tecnologia 2.4 GHz, enviando assim um sinal por rádio frequência para o receptor (2) localizado no carro. Esse receptor recebe o sinal e envia-o na forma de PWM para o microcontrolador (1). Cada canal possui um PWM independente, com período de 20 ms.

3.2.1.5 Sistema de energia

Para atender o requisito RE_HW_05 da Tabela 7, o sistema de energia é composto por uma bateria LiPo e o BEC (*Battery Eliminator Circuit*), presente no ESC. A bateria LiPo é uma bateria de 3 células (3S) de 5200 mAh com taxa de descarga de 30C da marca "POWER", conforme a Figura 26.

Figura 26 – Bateria de 5200 mAh da marca "POWER"



Fonte: Autoria própria

Já o BEC presente no ESC é responsável por fornecer a baixa tensão de alimentação do ESC e do microcontrolador. Esse BEC é do tipo linear com tensão de saída de 5 V e até 2 A de corrente.

Conforme a Figura 21, a bateria (4) fornece 12 V para o ESC (5) que faz o controle da potência do motor (7). Além disso, o ESC (5) fornece os 12 V para o BEC (6) que gera os 5 V necessários para os sistemas eletrônicos (1)(2)(8)(9).

3.2.1.6 Sensor de efeito Hall

Este foi o sensor escolhido para atender o requisito RE_HW_06 da Tabela 7. O sensor identifica a velocidade real de rotação de cada um dos motores. Ele foi fixado dentro do motor e identifica cada passagem dos ímãs localizado no rotor. Se o microcontrolador estiver enviando um sinal para o motor, porém a roda estiver travada ou patinando, o sensor detectara e o microcontrolador irá realizar as medidas de controle. Conforme a Figura 21, o sensor Hall (8) identifica a passagem dos ímãs do motor (7) e envia pulsos digitais para o microcontrolador (1).

3.2.1.7 Microcontrolador

Para atender o requisito RE_HW_07 da Tabela 7, foi definido que será utilizado neste projeto o microcontrolador TM4C123G encontrado no *kit* de desenvolvimento Tiva C *series LaunchPad* da *Texas Instruments*, mostrado na Figura 7. O microcontrolador é o responsável pelo gerenciamento de todos os dados no sistema embarcado. Ele fica localizado no interior do carro e utiliza da energia do BEC para realizar os comandos solicitados.

Conforme a Figura 21, o microcontrolador (1) é responsável por receber as informações do sensor (8) e do rádio controle (3) recebida pelo receptor (2). A partir da

programação e dos controles previamente definidos, é responsável por executar as malhas de controle digital especificadas no sistema.

Para o acoplamento dos sistemas eletrônicos ao microcontrolador, foi definida uma lista de pinos encontrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Alocação de portas do Tiva TM4C123G

Descrição	Função	Porta	Nome
Receptor Ch1	Timer	PD2	WT3CCP0
Receptor Ch3	Timer	PD3	WT3CCP1
Receptor Ch5	Timer	PD6	WT5CCP0
Receptor Ch6	Timer	PD7	WT5CCP1
ESC1 motor FL	PWM	PF0	M1PWM4
ESC2 motor FR	PWM	PF1	M1PWM5
ESC3 motor BL	PWM	PF2	M1PWM6
ESC4 motor BR	PWM	PF3	M1PWM7
Servo motor	PWM	PD0	M1PWM0
Sensor Hall1 FL	Timer	PB0	T2CCP0
Sensor Hall2 FR	Timer	PB1	T2CCP1
Sensor Hall3 BL	Timer	PB2	T3CCP0
Sensor Hall4 BR	Timer	PB3	T3CCP1

Fonte: Autoria própria.

Para finalizar, realizou-se uma simulação de posicionamento dos dispositivos eletrônicos, conforme a Figura 27. Para melhor circulação de ar, os ESCs ficaram na parte superior do carro. A bateria e o servo motor ficaram na posição previamente definida pelo *kit*. O receptor e o microcontrolador ficaram na parte inferior do carro.

Figura 27 – Simulação prévia do sistema eletrônico



Fonte: Autoria própria

3.2.2 Software

Para que o estudo do projeto ocorra com os controles eletrônicos necessários, foi preciso desenvolver um *software* a partir de uma lista de requisitos montada na Tabela 8.

Tabela 4 – Requisitos de Software

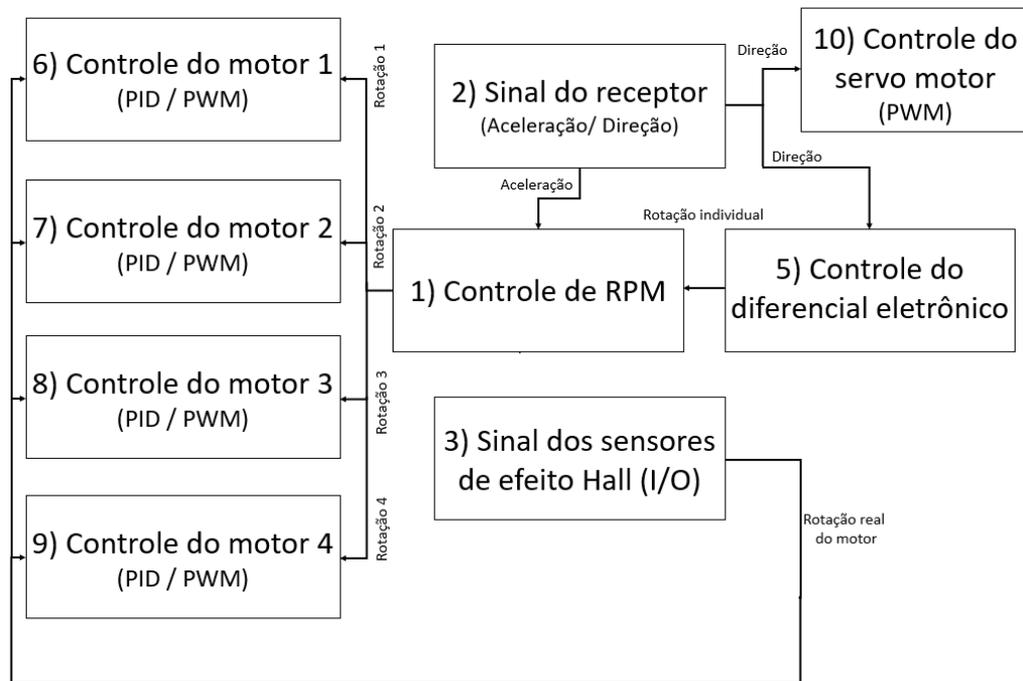
Descrição	Requisito	Prioridade
RE_SW_01	O sistema deve prover de um sistema operacional em tempo real	1
RE_SW_02	O sistema deve prover uma maneira de receber e ler os dados de aceleração e direção de um receptor	1
RE_SW_03	O sistema deve prover uma maneira de receber e ler o sinal digital de cada sensor de efeito Hall	2
RE_SW_04	O sistema deve ser capaz de calcular a velocidade de rotação do motor	2
RE_SW_05	O sistema deve prover um controle de velocidade independente para cada motor	2
RE_SW_06	O sistema deve prover de um controle de tração do tipo PID	3
RE_SW_07	O sistema deve ser capaz de ajustar a rotação do motor caso perceba que a velocidade real está menor que a velocidade exigida	3
RE_SW_08	O sistema deve ser capaz de controlar o diferencial de forma eletronicamente	2
RE_SW_09	O sistema deve prover de um controle de direção do servo motor	2

Fonte: Autoria própria.

Para cumprir com o requisito RE_SW_01, foi utilizado neste projeto o sistema operacional *Free RTOS*. Ele foi desenvolvido para ser utilizado em arquiteturas ARM *Cortex* e garante que um sistema seja realizado em tempo real. Com ele é possível realizar atividades simultâneas com um baixo tempo de resposta além de facilitar o desenvolvimento do *software*.

Analisando os dados da tabela de requisitos, foi desenvolvido um diagrama de blocos do sistema, facilitando o entendimento e a programação. Como o *software* foi feito por um sistema operacional do tipo RTOS, foi montado blocos que simulam as *threads* do programa. O diagrama de blocos pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Diagrama do *Software*



Fonte: Autoria própria

3.2.2.1 Recebimento de dados do receptor

Para cumprir com o requisito RE_SW_02 da Tabela 8, foi desenvolvida uma *thread* para receber os dados do receptor. Eles são recebidos através de um sinal PWM. Como esse receptor possui 6 canais, são 6 saídas e 6 PWMs diferente, com período de 20 ms. Porém, para este projeto, foi utilizado apenas 3 saídas, o canal 3 (sinal de aceleração), o canal 1 (sinal de direção) e o canal 5 (sinal de marcha ré). Posteriormente, poderá ser utilizado as demais saídas.

Para receber este sinal, foi utilizados *timers* no modo *timer capture*. Após isso, é calculado o *duty cycle* em % e enviado para o controle de RPM.

3.2.2.2 Sinal do sensores de efeito Hall

Para satisfazer os requisitos RE_SW_03, RE_SW_04 da Tabela 8, foi utilizado um sensor de efeito Hall fixado nos motores. Os dados do sensor são recebidos através de pulsos digitais. Para isto, foi utilizado um *timer* no modo *Input Edge Count* do microcontrolador que contará a quantidade de pulsos recebidos.

Uma *thread* é responsável por receber os pulsos dentro de 100 ms e em seguida calcular

a velocidade em razão do número de pulsos recebidos N . Após isso, a rotação real é enviada para os controles independentes dos motores. A fórmula para isso será:

$$R_{RPM} = \frac{2 \cdot N}{14 \text{ polos}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{0,1 \text{ s}} \quad (4)$$

3.2.2.3 Controle de RPM

Para satisfazer o requisito RE_SW_07 da Tabela 8, foi desenvolvida uma *thread* responsável por fazer o cálculo do *setpoint* do RPM para o controle de PID. Isso será feito através do recebimento de dados do receptor. Após isso, esse controle irá enviar a velocidade de *setpoint* de cada motor para os controles independentes.

3.2.2.4 Controle dos motores *Brushless*

Para realizar os requisitos RE_SW_05, RE_SW_06 e RE_SW_07 da Tabela 8, foi desenvolvida 4 *threads* para o controle independente do motor.

Inicialmente foi recebido o RPM real dos sensores de efeito Hall e o RPM de *setpoint* pelo controle de RPM e feito o cálculo do PID. Dessa forma, os motores respondem com um controle de tração, velocidade de rotação independente e irá buscar manter a rotação real sempre no valor de *setpoint*.

3.2.2.5 Controle do servo motor

E para finalizar, foi desenvolvida uma *threads* que irá enviar o mesmo sinal de PWM recebido pelo sinal do receptor. Assim o servo motor irá fazer o controle da direção de forma direta, realizando o requisito RE_SW_09 da Tabela 8.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONFECÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA

4.1.1 Confecção do suporte do motor

A fim de atender os requisitos mecânicos RE_MC_05 e RE_MC_07, que dizem respeito ao sistema de tração e proteção, realizou-se a confecção do suporte do motor, e para isto foi necessária uma chapa de aço 1020 laminado com espessura de 10 cm. Inicialmente, foi feita a marcação com as medidas obtidas pela planta do suporte. Utilizando uma serra de aço, foram feitos os cortes e as furações das peças de forma independente. Após cortar e lixar o suporte, iniciou-se o processo de soldagem da peça por um profissional capacitado.

Finalizada a confecção da peça, foi feita uma simulação no carro, constatando que havia uma pequena colisão com o braço da suspensão. Desta forma, foi necessário um pequeno ajuste na peça, conforme mostrado na Figura 29.

Além disto, realizou-se outra simulação, de fixação dos motores, onde também foi constatada uma falha. Como o motor possui o eixo saliente, foi necessário fazer um furo para o mesmo, conforme mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Suporte do motor em aço

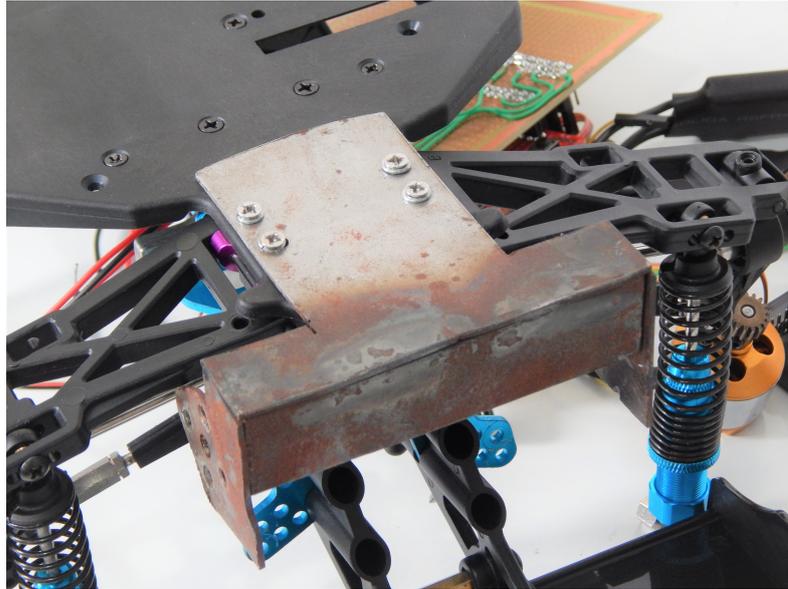


Fonte: Autoria própria.

Outro problema encontrado na fixação dos motores foi o fato de que os parafusos eram projetados para um suporte de maior espessura. Desta forma, foi necessário adquirir outros de menor comprimento.

Após as modificações realizadas, foi feita a fixação e todo o sistema se encaixou de forma perfeita, conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Fixação do suporte do motor



Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Adaptação do sistema de transmissão

Atendendo também ao requisito mecânico RE_MC_05 relacionado ao sistema de transmissão, foi realizada a adaptação da caixa do diferencial, e para isto foi necessário remover todo o conjunto interno do diferencial mecânico, restando apenas a caixa, os eixos e os rolamentos.

Duas engrenagens idênticas a engrenagem de tração do eixo cardã foram adquiridas para compor o novo sistema de transmissão independente. Estas engrenagens foram fixadas ao eixo do diferencial com uma massa epóxi bicomponente, conforme mostrado na Figura 31.

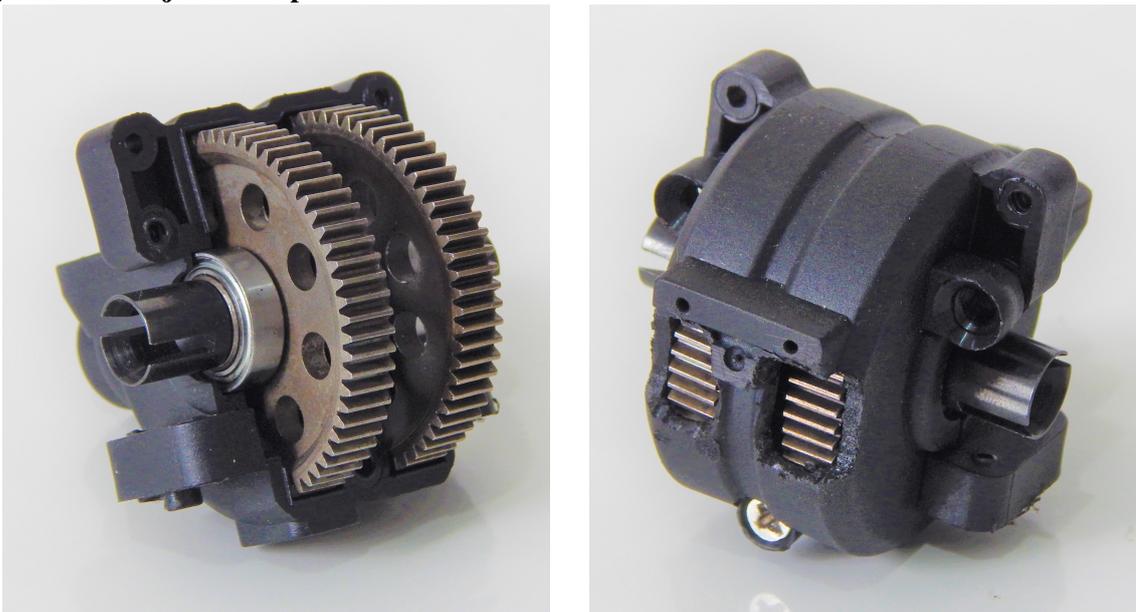
Posteriormente, foi inserido o rolamento de fixação na coroa, e esta a caixa de transmissão. Para o acoplamento da engrenagem com o pinhão dos motores, foi feita uma abertura na caixa de transmissão, utilizando uma ferramenta de derretimento de plástico, conforme observado na Figura 32.

Figura 31 – Fixação do eixo na engrenagem



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Conjunto completo do sistema de transmissão



Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Fixação dos sensores Hall

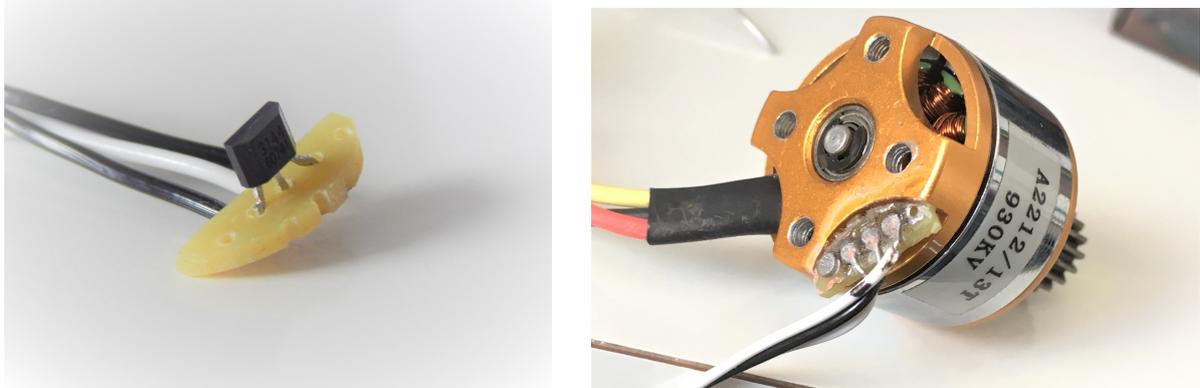
A fim de atender o requisito de *Hardware* RE_HW_06 relacionado ao sensor de medição de velocidade dos motores, foi feito um teste com o sensor fixado na lateral do motor. Porém, foi constatado que não havia um fluxo magnético suficiente para acionamento do mesmo.

Desta forma, foi realizado um segundo teste, buscando fixar o sensor pela parte traseira do motor, onde havia maior acessibilidade aos ímãs do rotor. A alternativa encontrada

foi utilizando também da massa epóxi bicomponente, a qual foi inserida junto ao sensor na parte traseira do motor e modelada de forma que os sensores ficassem bem posicionados e fixos. Porém, a dificuldade no posicionamento e o tempo de endurecimento da massa levou este sistema a se tornar falho.

Um terceiro processo foi realizado, mas desta vez buscando utilizar um pedaço de uma placa de fenolite para fixação com adesivo instantâneo universal. Então a placa foi modelada de forma que ficasse do mesmo formato da abertura do motor e que o sensor pudesse ser fixado, conforme observado na Figura 33. Após este processo, foi realizado a colagem junto ao motor e devido a secagem rápida do adesivo, foi mais simples de realizar o posicionamento.

Figura 33 – Fixação do sensor de efeito Hall



Fonte: Autoria própria.

4.2 CONFECCÃO DA ESTRUTURA ELETRÔNICA

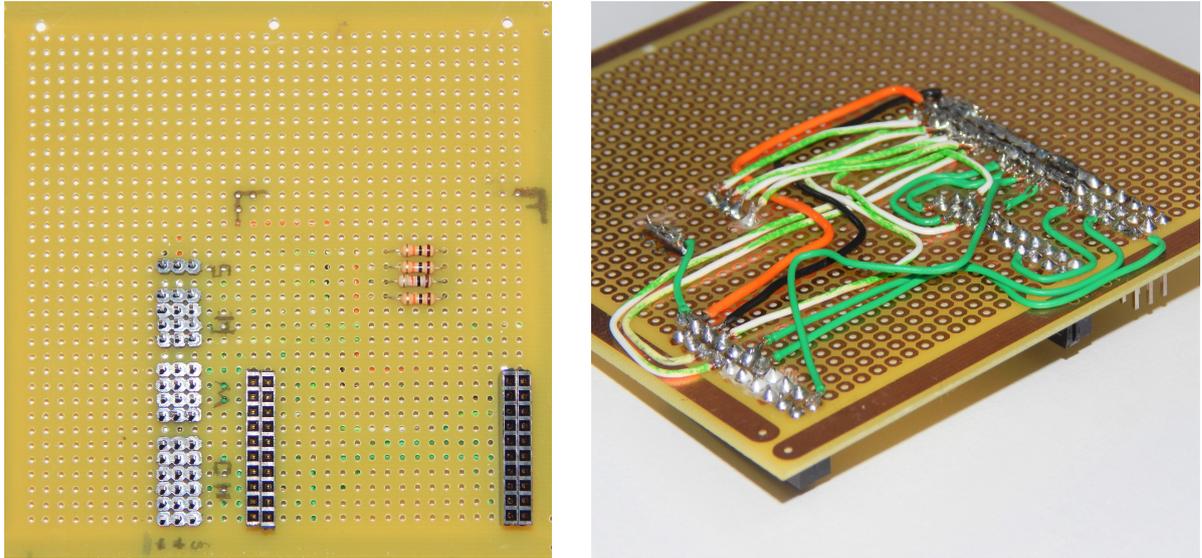
4.2.1 Confeção da placa de interface

Para a conexão do *kit* de desenvolvimento TM4C123G ao sistema do protótipo, foi feita a confecção de uma placa universal de padrão furada e ilhada com 10 x 10 cm.

Esta placa foi dimensionada para abrigar barras de pinos que fazem conexão entre as portas do *kit* com os motores, sensores e receptores de forma dinâmica, ou seja, ela pode ser reconfigurada facilmente para futuros ajustes no projeto. Além disso, facilita os testes uma vez que os sistemas podem ser facilmente removidos ou inseridos.

A estrutura final pode ser observada na Figura 34.

Figura 34 – Placa de interface



Fonte: Autoria própria.

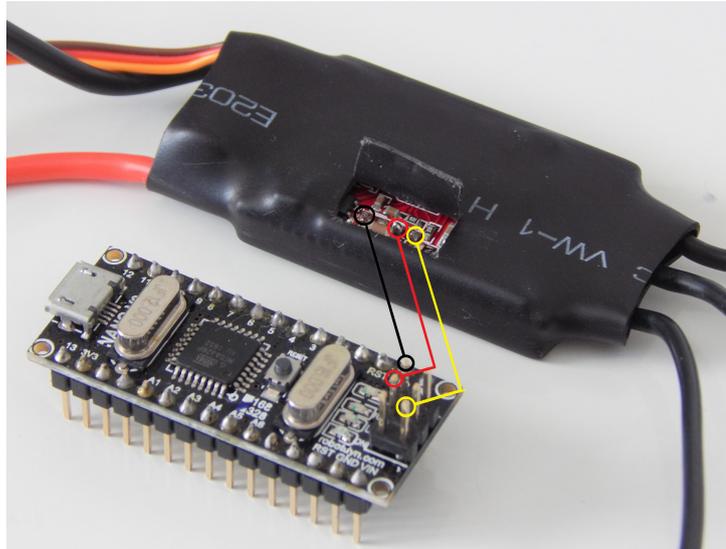
4.2.2 Reprogramação dos ESCs

Para atender o requisito de *hardware* RE_HW_02, foi preciso realizar a reprogramação dos ESCs uma vez que eles estavam programados apenas para um sentido de rotação. Com isto, foi necessário utilizar um Arduino Nano como programador AVR conectado internamente ao microcontrolador do ESC. Desta forma, realizou-se uma pequena abertura em seu invólucro e foi feita a conexão nos pinos apresentados na Figura 35.

Após este processo, o programador AVR foi conectado ao computador e feita a reprogramação do ESC com o *software* BLHeli para aceitar a tração inversa dos motores (marcha ré).

O maior desafio neste processo foi encontrar uma documentação adequada para a conexão dos pinos. No mercado existem diversos modelos diferentes de ESCs e programadores AVR, mas com poucos tutoriais para realizar o processo de reprogramação. A resposta encontrada para este problema foi buscar a documentação do próprio *software* BLHeli que apresentou a conexão dos pino do ESC e a ajuda do *datasheet* do Arduino Nano. A forma de conexão utilizada foi pelos pinos PB3 e PB4.

Figura 35 – Ligação do ESC com o programador AVR

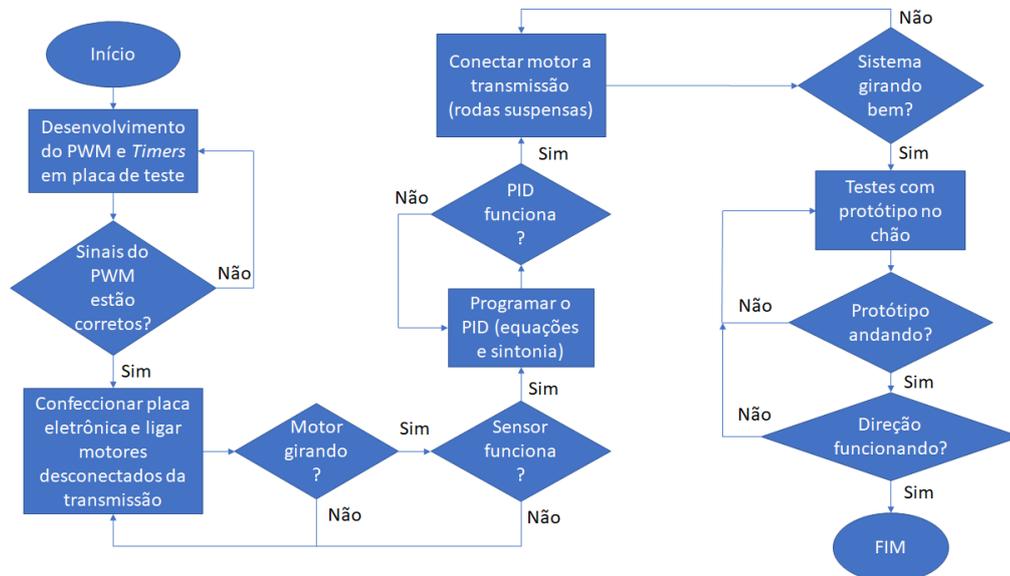


Fonte: A autoria própria.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO E REALIZAÇÃO DE TESTES

Para o processo de desenvolvimento do protótipo, foi montado um fluxograma contendo as etapas e os testes necessários, conforme apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Fluxograma de desenvolvimento do protótipo



Fonte: A autoria própria.

4.3.1 Desenvolvimento do PWM e dos *timers* utilizando uma placa de teste

Inicialmente, foi utilizada uma placa do tipo *protoboard* para realizar os testes iniciais de *software*. Foi desenvolvida uma parte do código e testada através do acendimento de LEDs, que estavam conectados através da placa.

Após os testes isolados, foi inserido o sistema operacional "FREERTOS" para visualizar o funcionamento do conjunto receptor/motor. Estes testes foram feitos para confirmar as seguintes partes de código:

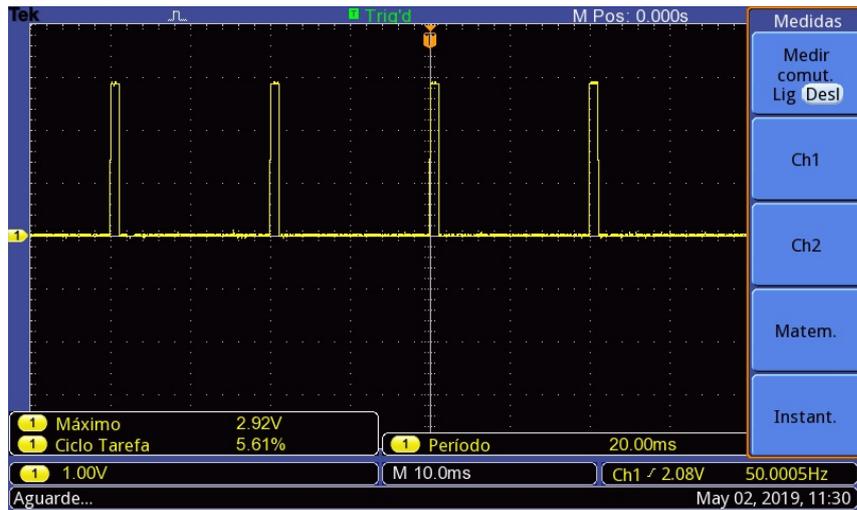
- PWM dos motores de tração;
- PWM do servo motor;
- Sinais do receptor.

4.3.2 Testes de sinais

A segunda parte dos testes foi realizada de forma a observar o comportamento da onda gerada pelo PWM do microcontrolador a fim de testar se o sinal estava condizente com o código. Para isto, foi utilizado um equipamento de análise de ondas (osciloscópio).

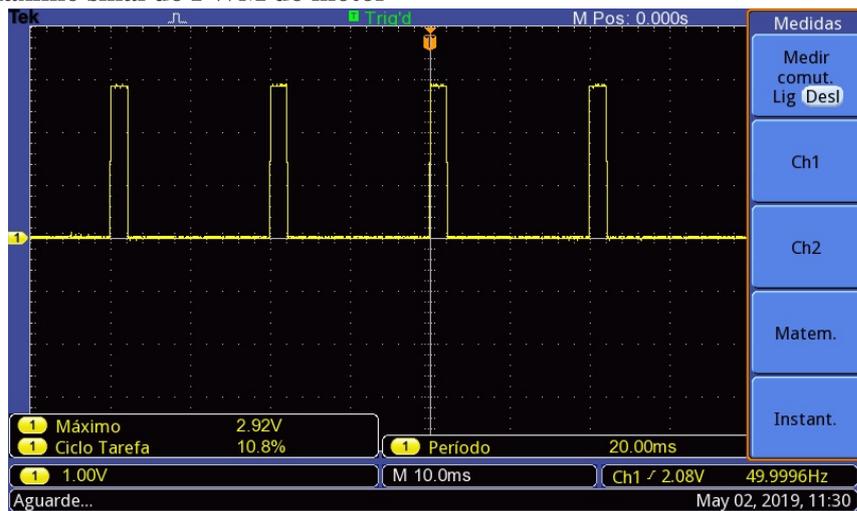
As formas de onda encontradas podem ser observadas nas Figuras 37 e 38, mostrando o mínimo e o máximo sinal gerado pelo PWM, respectivamente. O mínimo valor encontrado foi o *duty-cycle* de 5,61% e o máximo valor encontrado foi o com *duty-cycle* de 10,8% e período de 20 ms, comprovando que os valores estavam corretos conforme o programado.

Figura 37 – Mínimo sinal do PWM do motor



Fonte: Autoria própria.

Figura 38 – Máximo sinal do PWM do motor



Fonte: Autoria própria.

4.3.3 Testes com os motores desconectados da transmissão

Após a comprovação realizada pelo osciloscópio de que os sinais estavam corretos, foram realizados testes com o motor e o servo motor, onde foi feito o acionamento do rádio e observou-se o comportamento do sistema. Neste teste, foi possível observar que o sistema de recepção de sinal e envio para os motores estava funcionando perfeitamente.

A partir disto, foi feita a inserção do sensor Hall, onde inicialmente foi utilizado um ímã para testar e desenvolver o código dos sensores e posteriormente foi utilizado o motor em funcionamento para a implementação da equação de medição real da rotação do motor em RPM.

4.3.4 Desenvolvimento do sistema PID

Após desenvolvido e testado o código da recepção dos sinais dos sensores, foi desenvolvida a parte do código responsável pelo controle eletrônico de tração do tipo PID. Este teste foi fundamental para realizar os ajustes de resposta do sistema.

Toda a programação foi realizada para atender os requisitos de *software* RE_SW_05 RE_SW_06 e RE_SW_07, responsável pelo controle eletrônico de tração e velocidade de rotação independente dos motores.

4.3.4.1 Equações de conversão de unidade para o tratamento do controle PID

O primeiro desafio encontrado para o desenvolvimento do controle PID foi que o sistema haviam duas formas diferentes de unidade: o RPM em porcentagem, encontrado na comunicação do receptor e do motor, que representa o *duty cycle* do PWM, e o RPM real encontrado na comunicação do sensor de efeito Hall. Desta forma, o RPM real foi definido para trabalhar o PID e, portanto, um gráfico foi construído para a conversão das unidades, conforme apresentado na Figura 39 e Figura 40, onde o eixo Y representa a amplitude referente ao *duty cycle* (que varia de 6 a 10 %), e o eixo X representa a amplitude referente ao RPM real do motor (que varia de 0 a 7500 RPM).

Figura 39 – Relação do sinal de rádio e o RPM real em rotação direta



Fonte: Autoria própria.

Figura 40 – Relação do sinal de rádio e o RPM real em rotação inversa



Fonte: Autoria própria.

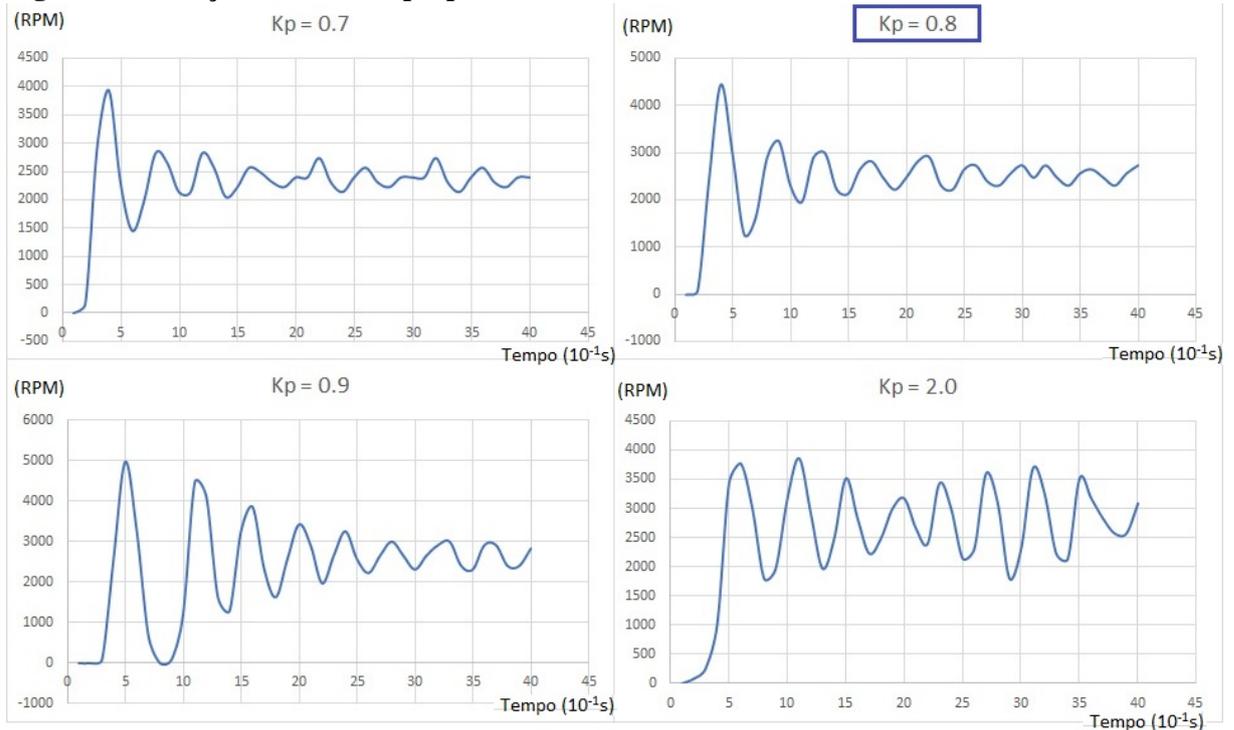
Desta forma, o conjunto de equações para conversão de unidades foi definido, conforme apresentado na Equação 5.

$$RPM_{real} = \begin{cases} (RPM_{\%} - 8) \cdot \frac{7500}{2}, & \text{se } RPM_{\%} \geq 8 \\ (8 - RPM_{\%}) \cdot \frac{7500}{2}, & \text{se } RPM_{\%} < 8 \end{cases} \quad (5)$$

4.3.4.2 Sintonia do controlador PID

Com o código desenvolvido, iniciou-se o processo de sintonia manual do controlador PID: a primeira etapa consiste em ajustar o controle proporcional através do ganho K_p . Utilizando um degrau de 0 a 5000 RPM e diferentes valores de K_p , é plotado um gráfico contendo a rotação em função do tempo, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Reação do controle proporcional do PID

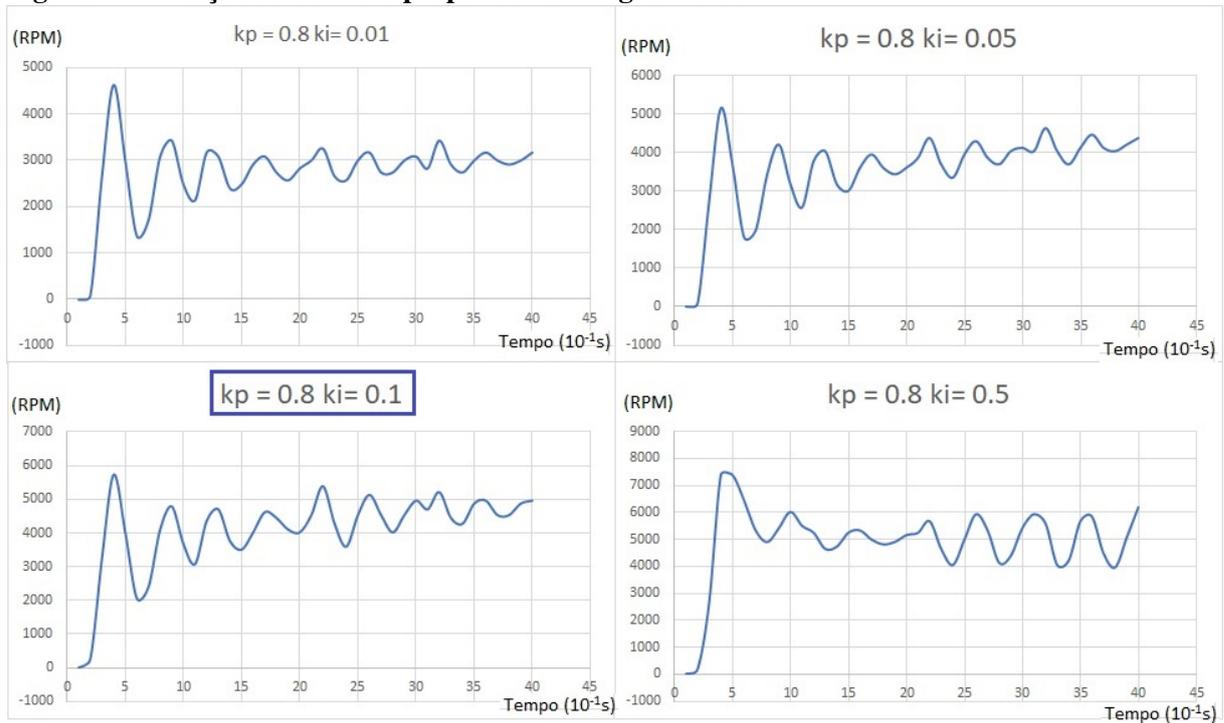


Fonte: Autoria própria.

Foi possível observar através destes gráficos que ganhos K_p muito elevados geram instabilidade no sistema, como o ganho $K_p = 2,0$. Para essa sintonia, buscou-se o ganho com decaimento de um quarto da amplitude, conforme observado no gráfico com $K_p = 0,8$, que tendeu à estabilidade próximo de 2500 RPM.

A segunda etapa consiste em ajustar o ganho K_i do controle integrativo. Utilizando ainda o degrau de 5000 RPM, $K_p = 0,8$ e diferentes valores de K_i , observou-se as seguintes reações, conforme observadas na Figura 42.

Figura 42 – Reação do controle proporcional integrativo do PID

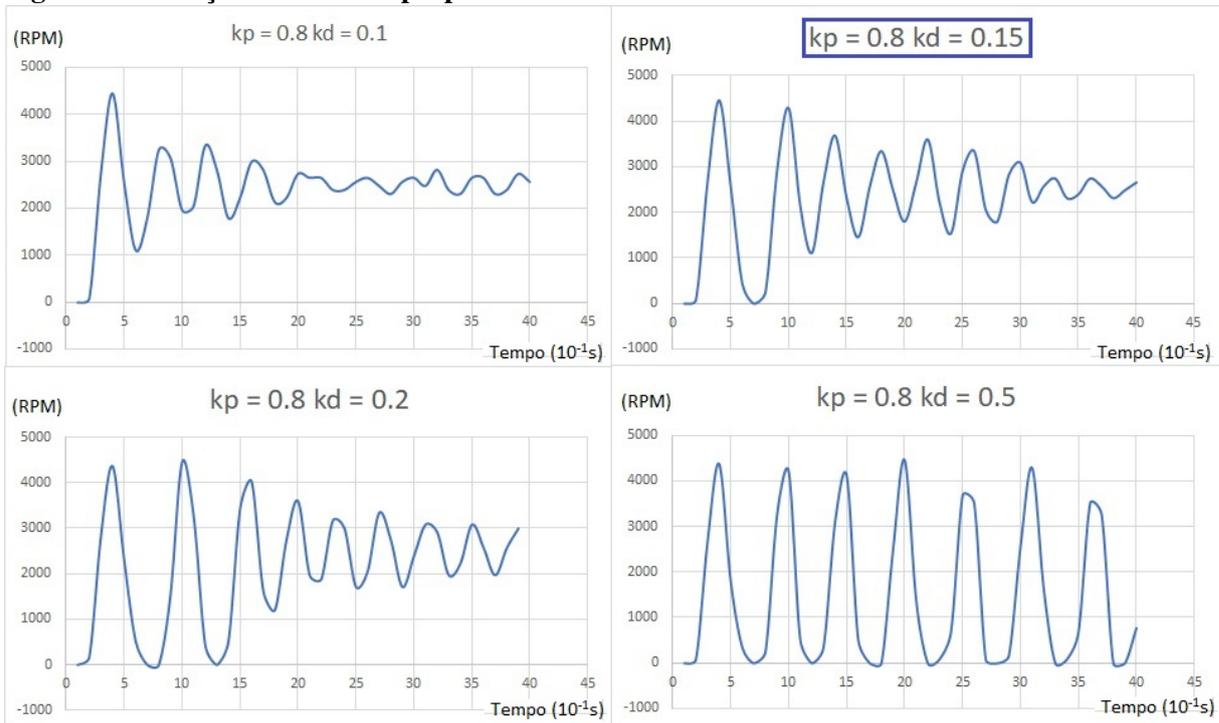


Fonte: Autoria própria.

Foi possível observar que baixos valores de K_i , como o de 0,01, tornaram o sistema lento e com a estabilidade abaixo do valor do degrau de 5000 RPM. Já o valor de $K_i = 0,1$ deixou o sistema estável e com o limite da estabilidade tendendo ao valor de 5000 RPM.

A terceira etapa consistiu em trabalhar apenas com os ganhos proporcional e derivativo. Com o mesmo degrau de 5000 RPM, $K_p = 0,8$ e K_d variando, buscou-se plotar gráficos, conforme observado na Figura 43.

Figura 43 – Reação do controle proporcional derivativo do PID

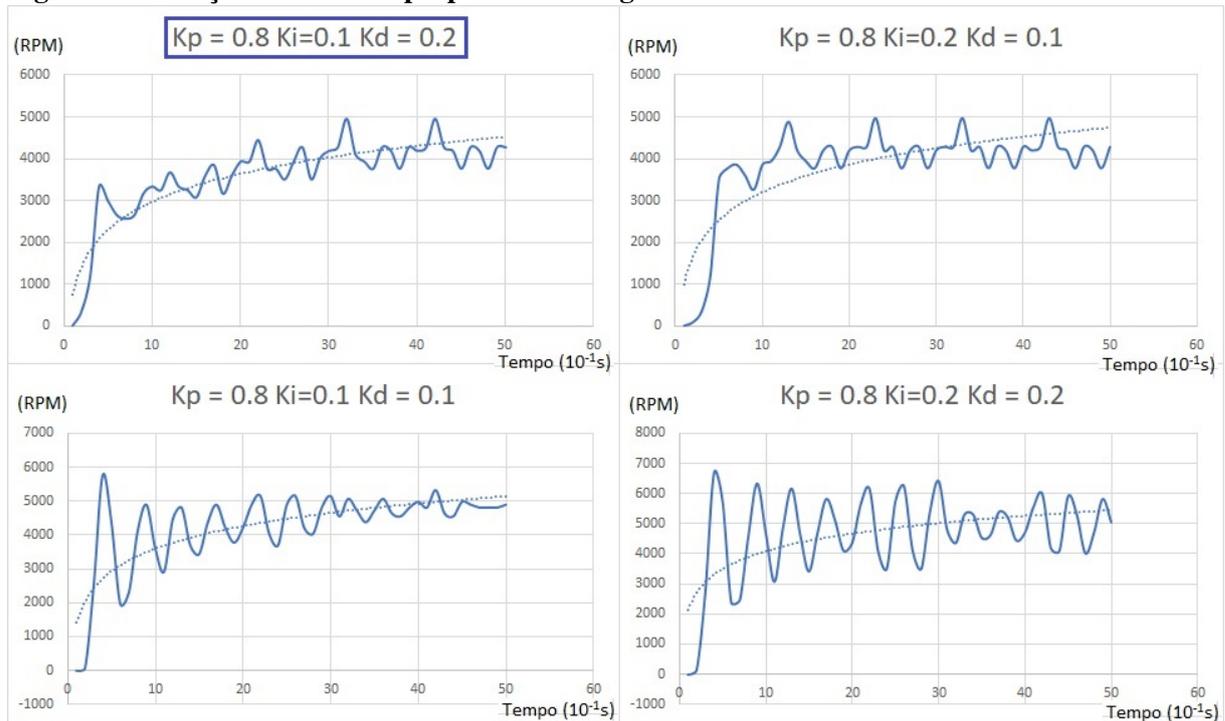


Fonte: Autoria própria.

Estes gráficos puderam mostrar que K_d com valores elevados também geraram instabilidade no sistema. Já valores próximos de 0,15 mostraram-se mais eficientes e buscando o limite da estabilidade próximo de 2500 RPM.

Para finalizar o processo de sintonia, buscou-se variar os 3 ganhos K_p , K_i e K_d e observar a resposta ao sistema. Os valores encontrados com o degrau de 5000 RPM podem ser observados na Figura 44.

Figura 44 – Reação do controle proporcional integrativo derivativo do PID



Fonte: Autoria própria.

Conclui-se então que para essa aplicação, o ideal seria uma resposta lenta ao degrau, a fim de controlar a tração buscando sempre o atrito estático ao solo. Com isto, os valores para $K_p = 0,8$, $K_i = 0,1$ e $K_d = 0,2$ mostraram-se mais eficientes, uma vez que apresentaram uma resposta progressiva e lenta, buscando a estabilidade próxima dos 5000 RPM.

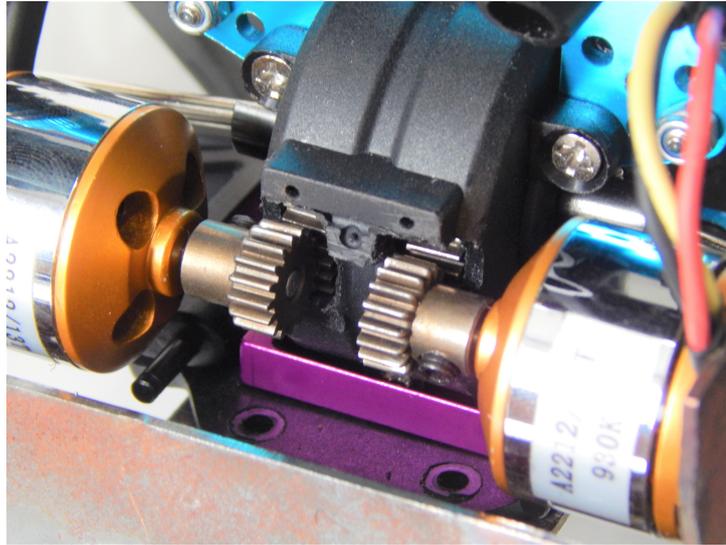
4.4 TESTES FINAIS DO PROJETO

4.4.1 Testes com os motores conectados a transmissão e rodas suspensas

O objetivo do teste com os motores conectados à transmissão, mas com as rodas suspensas, foi observar o comportamento do sistema eletrônico ao introduzir um pequeno torque nos motores. Neste momento, todo o sistema já estava conectado e operando, conforme observado na Figura 45.

Foi observada através desse teste a falta de lubrificação das partes móveis do sistema, pois havia muito atrito e dificuldade de giro em ambos os motores (tração e direção). A solução foi a inserção de um óleo lubrificante, que resultou em uma melhor rotação e diminuição de atrito do sistema como um todo.

Figura 45 – Motor posicionado e conectado a transmissão



Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Testes finais com sistema completo em solo

Inicialmente foi constatado um problema relacionado a direção do protótipo, onde havia uma dificuldade de giro do sistema de direção das rodas frontais, o qual foi encontrado em um dos braços da suspensão e corrigido. Além disto, também foi feita a lubrificação das partes móveis com óleo lubrificante.

Outra situação encontrada foi o fato de que a bateria estava deslocando o centro de gravidade do carro. Para corrigir este problema, foi realizado um balanceamento nas molas da suspensão.

Então, realizado mais um teste em solo, pôde-se constatar que o sistema estava com torque e tração suficientes para locomoção do carro conforme a Figura 46.

Figura 46 – Protótipo completo



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Dadas as pesquisas feitas, foi possível entender o porquê de carros à combustão serem a preferência no momento e porque ela não perdurará por muito mais tempo. Em um futuro próximo, os carros elétricos terão maior familiarização e disponibilidade no mercado, e como conseguem trazer ao público mais segurança e eficiência, serão os modelos mais influentes e de maior importância. Nisso, cabe também a importância do automodelo desenvolvido: possibilitar estudos acerca de uma visão de futuro na qual o sistema elétrico será dominante.

A pesquisa proveu valiosos conhecimentos a cerca dos sistemas de controle e de *hardware*. Quanto ao desenvolvimento da mecânica, partiu-se do princípio de modelos pré-existentes no mercado. O fato de o carro ter quatro motores representou um grande desafio, uma vez que existe pouquíssimo estudo sobre automóveis desse tipo e, em consequência, encontra-se poucas peças disponíveis para adaptar o sistema de fixação do motor. Mudanças cautelosas foram levadas em conta para que não interferisse nos outros sistemas do automodelo. Então, construí-se um modelo físico para adaptação do sistema mecânico de transmissão que apresentou-se eficiente ao conjunto. Entretanto, como a prioridade deste projeto estava na estrutura eletrônica, foi realizada apenas a adaptação do sistema de transmissão traseiro.

Acerca do *software*, este foi desenvolvido a partir de vários testes e simulações, onde o desafio foi adquirir conhecimento sobre o sistema operacional em tempo real (RTOS) e a programação dos temporizadores do microcontrolador. Porém de modo geral, a programação mostrou-se bastante eficiente e de grande aprendizado.

Entretanto, a parte eletrônica do projeto mostrou-se trabalhosa. Houveram inúmeras tentativas de instalação do sensor de efeito Hall no motor. Porém, este não estava preciso suficiente. Para sua fixação, foram feitos estudos acerca de diferentes materiais e posições, e concluiu-se que a melhor posição encontrada foi aquela que conseguiu realizar o máximo de leituras possível. Além disso, imaginava-se que o sensor conseguiria fazer a leitura dos 14 ímãs independentes, quando na verdade o que o sensor estava identificando era o fluxo magnético gerado entre pares de ímãs. Isto gerou uma contagem máxima de 7 pulsos por rotação. O resultado final possibilitou um estudo suficiente e de grande aprendizado, entretanto, foram gerados gráficos com ruídos, os quais não estavam zerando o erro de estado estacionário. Apesar

da leitura parcial dos ímãs, foi possível criar um programa capaz de calcular a velocidade de rotação do motor e prover o controle de tração PID.

Já relação ao controlador eletrônico de velocidade do motor (ESC), houve uma grande dificuldade na reprogramação, uma vez que há pouca documentação a respeito e uma grande diversidade de ESCs. Mas após longas pesquisas, foram encontradas as formas de conexão através do programa BLHeli, que se mostrou acessível e simples de trabalhar.

Concluiu-se, então, que este foi um projeto que agregou um grande valor educacional e que mostrou-se presente nas áreas de mecânica, eletrônica e computação. O conhecimento adquirido acerca de novas tecnologias relacionadas a carros elétricos foi de grande importância, uma vez que é possível observar essa tendência futura. Portanto, mesmo que o controle eletrônico de tração não tenha se mostrado perfeito, foi alcançado o objetivo deste projeto: o estudo e desenvolvimento de controles eletrônicos. Além disto, este é um projeto que servirá de base para muitas outras aplicações e com certeza irá alavancar os estudos sobre controles eletrônicos automotivos.

REFERÊNCIAS

- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no brasil. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, mar. 2011.**, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2011.
- BLHELI. **BLHeli**. 2018. Disponível em: <<https://chrome.google.com/webstore/detail/blheli-configurator/mejfggmbnocnfbibmoogocnjbcjnk>>. Acesso em: 27-Novembro-2018.
- BRAGA, N. Como funcionam os servos. **<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/robotica/5164-mec066a>**. Acesso em 27 de outubro de 2018, 2014.
- BRAGA, N. Todos os tipos de motores. **<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/robotica-e-mecatronica/9435-todos-os-tipos-de-motores-mec149>**. Acesso em 27 de outubro de 2018, 2014.
- BRAGA, N. Como funcionam os sensores de efeito hall. **<http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/6640-como-funcionam-os-sensores-de-efeito-hall-art1050>**. Acesso em 27 de outubro de 2018, 2015.
- EPXX. **O que significa o Kv dos motores de modelismo?** 2017. [Online; acessado em 27-Outubro-2018]. Disponível em: <<https://epxx.co/artigos/motor.html>>.
- FAZERFACIL.COM. **Carros**. 2018. [Online; acessado em 24-Novembro-2018]. Disponível em: <http://www.fazerfacil.com.br/carros/carros_master.htm>.
- FREERTOS. 2018. Disponível em: <<https://www.freertos.org/>>. Acesso em: 28-Novembro-2018.
- GUTIERREZ, J.; CARVALHO, R. D. **O Automóvel Na Visão Da Física - Leituras Compleme**. AUTÊNTICA EDITORA, 2013. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=mCQmvgAACA AJ>>.
- HOBBYKING. **Everything You Need to Know About Electronic Speed Controllers (ESC)**. 2018. [Online; acessado em 27-Outubro-2018]. Disponível em: <https://hobbyking.com/en_us/news/everything-need-know-electronic-speed-controllers-esc?__store=en_us>.
- HOYER, K. G. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. **Utilities Policy**, Elsevier, v. 16, n. 2, p. 63–71, 2008.
- INSTRUMENTS, T. **Arm cortex-m4f based mcu tm4c123g launchpad evaluation kit**. 2016. [Online; acessado em 27-Outubro-2018]. Disponível em: <[Disponível online em http://www.ti.com/tool/ek-tm4c123gxl](http://www.ti.com/tool/ek-tm4c123gxl)>.
- LATINNCAP. **Segurança primária ou ativa**. 2018. [Online; acessado em 09-Abril-2018]. Disponível em: <<https://www.latinnacap.com/po/nossos-testes/seguranca-primaria-ou-ativa>>.

MAIA, B. **Sistema de tempo real FreeRTOS**. 2013. Disponível em: <<https://prezi.com/jngegznm5cy/sistema-de-tempo-real-freertos/>>. Acesso em: 28-Novembro-2018.

OLIVEIRA, S. S. d. **Procedimento para escolha de pontos de acesso de redes sem fio Wi-Fi indoor**. 2014. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2014.

OUTRC. **Como funciona um Rádio 2.4 Ghz?** 2011. [Online; acessado em 27-Outubro-2018]. Disponível em: <<http://outrc.com.br/outrcblog/2011/01/08/como-funciona-um-radio-24-ghz/>>.

STROSKI, P. N. **Baterias LiPo**. 2017. [Online; acessado em 27-Outubro-2018]. Disponível em: <<http://www.electricalibrary.com/2017/08/12/baterias-lipo/>>.

STRUBEN, J.; STERMAN, J. D. Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems. **Environment and Planning B: Planning and Design**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 35, n. 6, p. 1070–1097, 2008.

APÊNDICE A – LISTA DE MATERIAIS

Tabela 5 – Lista de Materiais

Item	Quantidade
Kit de automodelo elétrico	1
Conjunto engrenagem tração	4
Placa metal	1
Motor elétrico	4
ESC	4
Servo Motor	1
Microcontrolador	1
Sensor Hall	4
Sensor ultrassônico	1
Rádio controle e Receptor	1
Baterias para o rádio (AA)	8
Bateria LiPo	1
Programador AVR	1
Cabinhos	1
Fitas de Nylon	30

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – LISTA DE REQUISITOS

Tabela 6 – Requisitos mecânicos

Descrição	Requisito
RE_MC_01	O carro deve conter 4 rodas
RE_MC_02	O carro deve conter um sistema independente de amortecimento
RE_MC_03	O carro deve conter um sistema de direção
RE_MC_04	O carro deve conter um chassi para apoio dos sistemas
RE_MC_05	O carro deve conter tração independente nas 4 rodas, sendo cada uma controlada por 1 motor
RE_MC_06	O carro deve conter espaço para acoplamento do sistema eletrônico
RE_MC_07	O carro deve conter um sistema de proteção contra impactos

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Requisitos de *Hardware*

Descrição	Requisito
RE_HW_01	O carro deve possuir 4 motores elétricos
RE_HW_02	O carro deve possuir 4 dispositivos de controle eletrônico de velocidade (ESC) com rotação bidirecional
RE_HW_03	O carro deve possuir um dispositivo eletrônico capaz de direcionar as rodas frontais
RE_HW_04	O carro deve ser controlado por um sistema de rádio controle
RE_HW_05	O carro deve conter um sistema de baterias para alimentar o motor e os sistemas eletrônicos
RE_HW_06	O carro deve conter um conjunto de sensores para medir a rotação real dos motores
RE_HW_07	O carro deve conter dispositivo de controle - microcontrolador - responsável por processar todos os dados

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Requisitos de Software

Descrição	Requisito	Prioridade
RE_SW_01	O sistema deve prover de um sistema operacional em tempo real	1
RE_SW_02	O sistema deve prover uma maneira de receber e ler os dados de aceleração e direção de um receptor	1
RE_SW_03	O sistema deve prover uma maneira de receber e ler o sinal digital de cada sensor de efeito Hall	2
RE_SW_04	O sistema deve ser capaz de calcular a velocidade de rotação do motor	2
RE_SW_05	O sistema deve prover um controle de velocidade independente para cada motor	2
RE_SW_06	O sistema deve prover de um controle de tração do tipo PID	3
RE_SW_07	O sistema deve ser capaz de ajustar a rotação do motor caso perceba que a velocidade real está menor que a velocidade exigida	3
RE_SW_08	O sistema deve ser capaz de controlar o diferencial de forma eletronicamente	2
RE_SW_09	O sistema deve prover de um controle de direção do servo motor	2

Fonte: Autoria própria.