



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EUFRÁZIO FLORENTINO DANDA NETO

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE UM ATUADOR ROTATIVO APLICADO A
AUTOMATIZAÇÃO DE CÂMBIO DE UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO DO TIPO
FORMULA SAE**

JOÃO PESSOA - PB

2018

EUFRÁZIO FLORENTINO DANDA NETO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Mecânica da Universidade Federal
da Paraíba, como parte das exigências para a
conclusão do curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina

JOÃO PESSOA – PB

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N469p Neto, Eufrazio Florentino Danda.

Projeto e Fabricação de um Atuador Rotativo Aplicado a
Automatização de Câmbio de um Veículo de Competição do
Tipo Formula SAE / Eufrazio Florentino Danda Neto. -
João Pessoa, 2018.
62 f. : il.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. automatização de câmbio. 2. atuador rotativo. 3.
Formula SAE. 4. mecanismo de quatro barras. I. Título

UFPB/BC



AValiação do Trabalho de Conclusão de Curso - TCC

NOME EVERAÉIO FLORENTINO DANTAS NETO Matrícula 11021205
TÍTULO: Projeto e Fabricação de um Atuador
Rotativo Aplicado A Automatização de Câmbio
de um Veículo de Competição do Tipo Formula
SAE.

AValiação

Prof. <u>Koji Daniel L. Murrina Koji</u>	<u>1</u>	<u>10,0</u>
Orientador	Rubrica	Nota
Prof. <u>Quynh Ly do Santos</u>	<u>1</u>	<u>10,0</u>
Membro	Rubrica	Nota
Prof. <u>Anderson Francisco Costa Araújo</u>	<u>1</u>	<u>10,0</u>
Membro	Rubrica	Nota

Média Final: 10,0

Situação: ☒ aprovado / () reprovado

RECOMENDAÇÕES:



João Pessoa, 14 de DEZEMBRO de 2018

OBS: A REFERIDA MÉDIA SÓ SERÁ IMPLANTADA APÓS AS CORREÇÕES EXIGIDAS PELO ORIENTADOR.

Dedico esse trabalho, primeiramente, a toda a minha família, pelo suporte que me foi dado, sem o qual não seria possível a dedicação exclusiva e necessária para tanto. Dedico-o, também, a todos os amigos que fiz durante esta etapa da minha vida, que participaram, junto a mim, da construção da pessoa que sou hoje. Enfim, dedico-o especialmente a família Formula UFPB pela enriquecedora experiência que vivenciei durante esses quatro anos com a equipe.

Agradeço a ajuda prestimosa do meu orientador, Dr. Koji Mishina, pela maneira paciente com a qual tratou e vem tratando das questões dos seus alunos junto à coordenação do curso e à universidade e pela compreensão das dificuldades de cada aluno, talento essencial para uma boa docência e que o mesmo possui em abundância.

“Reunir-se é um começo, permanecer juntos é um progresso e trabalhar juntos é um sucesso.”

Henry Ford

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o projeto e construção de um atuador rotativo aplicado à automatização do sistema de câmbio de um veículo de competição do tipo Formula SAE. O mesmo é constituído de um conjunto de um motor elétrico e uma redução planetária de uma parafusadeira sem fio, uma carcaça projetada e usinada em alumínio, um suporte de chapas metálicas soldadas e um mecanismo de quatro barras para transmissão de movimento rotativo entre o eixo do atuador e o eixo da alavanca de câmbio do motor do veículo. O sistema se mostrou robusto, de baixo custo, de fácil fabricação, confiável e alcançou um tempo de acionamento de câmbio de 125 milissegundos, apresentando desempenho superior ao de sistemas semelhantes de outras equipes.

Palavras-chaves: Automatização de câmbio, atuador rotativo, Formula SAE, mecanismo de quatro barras.

ABSTRACT

This work aims to accomplish the design and manufacturing of a rotary actuator applied to the automation of the gearshift system of a Formula SAE type racing vehicles. It consists of an electric motor with a planetary gear mechanism, a designed and machined aluminum case, a support made of welded metal plates and a four-bar linkage for transmitting rotary motion between the actuator shaft and the shift lever shaft of the vehicle engine. The system proved to be robust, inexpensive, easy to manufacture, reliable and achieved a 125 millisecond shifting time, reaching superior performance to similar systems from other teams.

Keywords: Gearshift automation, rotary actuator, Formula SAE, four-bar linkage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Organograma da equipe Formula UFPB	15
Figura 2 - Átomo de hidrogênio à esquerda e átomo de hélio a direita.....	18
Figura 3 - Representação de um átomo.	19
Figura 4 - Íons e elétrons livres.	20
Figura 5 - Corrente real e convencional de um circuito elétrico.	22
Figura 6 - Símbolo da resistência elétrica.	22
Figura 7 - Cabos e fios.....	26
Figura 8 - Modelo do motor de corrente contínua e ímãs permanentes.	28
Figura 9 - Mecanismo de quatro barras em forma de paralelogramo.....	29
Figura 10 - Mecanismo de quatro barras na forma de um retângulo.....	29
Figura 11 - Patente de James Watt de 1784. Caixa de engrenagens de duas velocidades com engajamento por engrenagens cachorro.	31
Figura 12 - Caixa de engrenagens de Griffith de 1821, com duas velocidades e engrenagens deslizantes.....	31
Figura 13 - Transmissão de Selden, 1879, com embreagem, engrenagem de reversão e caixa fechada.....	31
Figura 14 - Transmissão da moto Honda CBR600	32
Figura 15 - Engrenagem cachorro.	33
Figura 16 - Transmissão da moto Honda CBR 600 (vista do trambulador).....	33
Figura 17 - Trambulador da moto Honda CBR600RR.....	34
Figura 18 - Mecanismo de acionamento do trambulador.	34
Figura 19 - Motor de um veículo Smart Fortwo com vista para o sistema de transmissão.....	35
Figura 20 – Motor servo Smart-Original para veículo Smart Fortwo 451.	35
Figura 21 - Mecanismo de acionamento da transmissão Getrag 431. Em (1), vemos atuador elétrico; (2), o trambulador e (3), os garfos.....	36
Figura 22 - Sistema Flatshifter Max instalado numa motocicleta.	37
Figura 23 - Sistema Geartronics Paddleshift para acionamento eletrônico da marcha e da embreagem.....	38
Figura 24 - Balança eletrônica de precisão SF-400.....	40
Figura 25 - Medição do torque necessário para acionar a alavanca de câmbio.....	40

Figura 26 - Conjunto do motor e redução planetária com seletor de velocidades.	41
Figura 27 - Redução planetária com seletor de velocidades.	42
Figura 28 - Desenho da carcaça do atuador.....	42
Figura 29 - Mecanismo de quatro barras como transmissão de torque.	43
Figura 30 - Suporte com flange em chapa de aço.....	44
Figura 31 - Mecanismo com carcaça de alumínio e flange.	45
Figura 32 - Projeto do mecanismo instalado no motor.....	45
Figura 33 - Circuito equivalente do motor com rotor bloqueado;.....	47
Figura 34 - Vista explodida do atuador com flange de fixação e mecanismo de quatro barras.	48
Figura 35 - Atuador montado.	49
Figura 36 - Mecanismo fabricado e instalado no motor.	49

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

AISI – American Iron and Steel Institute;

AMT – Automated Manual Transmission;

AWG – American Wire Gauge;

CT – Centro de Tecnologia;

ECPA – Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo;

IPC – Institute for Printed Circuits;

MIT – Massachusetts Institute of Technology;

MT – Manual Transmission;

SAE - Society of Automotive Engineers;

SP – São Paulo;

UFPB – Universidade Federal da Paraíba;

UTA – The University of Texas at Arlington.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistividade e coeficiente de temperatura de vários materiais.	23
Tabela 2 – Condutividade relativa de vários materiais.	25
Tabela 3 – Resistência elétrica de cabos flexíveis de instalações prediais.....	27
Tabela 4 - Resistência elétrica para quatro metros de cabos flexíveis.	46
Tabela 5 - Quedas de tensão nos condutores.	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 O PROJETO FORMULA UFPB	15
1.2 A COMPETIÇÃO	16
1.3 OBJETIVO DO TRABALHO	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 CIRCUITOS ELÉTRICOS	18
2.1.1 Tensão e Corrente Elétrica	18
2.1.2 Resistência.....	22
2.1.3 Lei de Ohm.....	23
2.1.4 Circuitos em Série e Paralelo.....	24
2.1.5 Condutores e Isolantes	25
2.2 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA E IMÃS PERMANENTES	27
2.3 MECANISMO DE QUATRO BARRAS.....	28
2.4 BREVE HISTÓRIA DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	30
2.5 SISTEMA DE CÂMBIO DE MOTOCICLETAS	32
2.6 AUTOMATIZAÇÃO DE CÂMBIOS SEQUENCIAIS	34
2.7 AUTOMATIZAÇÃO DE CÂMBIOS E VEÍCULOS DE FORMULA SAE.....	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 MEDIÇÕES INICIAIS.....	39
3.2 PROJETO DO ATUADOR ROTATIVO	41
3.3 MECANISMO DE QUATRO BARRAS.....	43
3.4 SUPORTE DO ATUADOR	44
3.5 CABOS E CONECTORES ELÉTRICOS.....	46
3.6 FABRICAÇÃO	49
4 RESULTADOS.....	51
5 CONCLUSÃO.....	52
6 SUGESTÕES	53

REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE A – CORPO DO CASE	56
APÊNDICE B – TAMPA INFERIOR DO CASE	57
APÊNDICE C – TAMPA SUPERIOR DO CASE	58
APÊNDICE D – SUPORTE DO CASE.....	59
APÊNDICE E – ALAVANCA DE CÂMBIO	60
APÊNDICE F – BARRA INTERMEDIÁRIA.....	61
APÊNDICE G – ALAVANCA MOTORA.....	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 O PROJETO FORMULA UFPB

O projeto Formula UFPB pertence a Universidade Federal da Paraíba e propicia a difusão e o intercâmbio de técnicas e conhecimentos para os alunos ingressantes dos cursos de engenharias, administração e outros que tenham relações com a indústria automotiva. Essa experiência se dá com o projeto e a construção de um protótipo de competição automotiva, pelos próprios alunos para a competição nacional de Formula SAE.

A composição da equipe varia anualmente conforme a quantidade de alunos que se inscrevem no processo seletivo e são admitidos no início de cada ano. No ano de 2017, foram admitidos quarenta e nove alunos de diversos cursos de graduação, além das engenharias vinculadas a área automotiva.

A estrutura que organiza a equipe, conforme Figura 1, tem os professores orientadores, Dr. Koje Mishina, Dr. Marcelo Rodrigues e Dr. Abel Cavalcante, como responsáveis pelo projeto. Em segundo plano, temos o capitão da equipe, Bruno Paulino, como líder nas atividades cotidianas e na competição. Sob a liderança do capitão, temos o gerente de projeto, Matheus Moraes e as lideranças de marketing e finanças. Sob a liderança do gerente de projetos, temos os líderes dos subsistemas de elétrica, freio, motor e transmissão, estrutura e, sob essas lideranças, os demais integrantes.

Figura 1- Organograma da equipe Formula UFPB



Fonte: Próprio autor.

1.2 A COMPETIÇÃO

A competição nacional de Formula SAE, criada em 2004, é parte de um grande evento de engenharia automobilística mundial, organizado pela *Society of Automotive Engineers*¹ (SAE) focado em alunos de graduação. A etapa nacional acontece anualmente na cidade de Piracicaba – SP, no Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo (ECPA) e envolve uma grande quantidade de participantes de equipes representando universidades de todo o país.

O evento acontece durante três dias consecutivos, divididos em provas estáticas, dinâmicas, apresentações de custos, apresentação de projetos, e outros. Todas essas etapas resultam no acumulo de uma pontuação que é, posteriormente, usada como critério classificatório.

A experiência de interação entre as equipes, semelhante a um grande congresso de engenharia, é muito enriquecedora, pois permite ao aluno conhecer estudantes de outras equipes, comparar soluções diferentes para problemas semelhantes além de acumular um valioso aprendizado ao ser avaliado por engenheiros da área automotiva.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O presente trabalho objetivou o projeto e fabricação de um atuador elétrico rotativo para um sistema de câmbio automatizado para o veículo protótipo de competição da equipe Formula UFPB, participante da competição de engenharia e automobilismo Formula SAE, com o intuito de melhorar o sistema do câmbio sequencial manual disponível no veículo, no que tange à equiparação do tempo de troca de marcha ao de grandes equipes competidores e a ergonomia de pilotagem.

O veículo protótipo é um carro do tipo Formula SAE e faz uso de um motor originário de uma moto Honda CBR600rr, modelo 2008. Esse motor, como na maioria das motocicletas disponíveis no mercado, possui um sistema de câmbio sequencial acionado por uma alavanca de pedal. A adaptação utilizada para o sistema de câmbio manual consistia de uma alavanca manual disponível no posto de pilotagem, com um tubo de aço interligando a alavanca manual à alavanca de pedal disponível no motor.

O sistema manual adotado pela equipe apresentou um excelente desempenho e demonstrou ser muito confiável com os testes desenvolvidos até então, mas o seu acionamento

¹ Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE).

exigia que o piloto retirasse a sua mão esquerda do volante para acionar a alavanca de câmbio. Esse processo, apesar de simples, dispendia de um tempo valioso para acontecer e exigia um certo grau de atenção do piloto, o que se mostrou pouco ergonômico e lento em comparação com sistemas semiautomatizados utilizados por outras equipes competidoras.

Para esse projeto, não foi utilizada nenhuma metodologia de projeto específica, mas uma metodologia particular simplificada. Partindo da problemática exposta, foram traçados requisitos para o desenvolvimento desse projeto, que consistiram da elaboração de um sistema confiável, de rápido acionamento, ergonômico e, levando em conta a dificuldade da equipe de adquirir e processar recursos, ser de baixo custo. A metodologia será melhor explicada mais adiante.

As possíveis soluções para o acionamento da alavanca de câmbio observadas na pesquisa feita pela equipe nas competições anteriores e em pesquisas feitas nos fóruns de Formula SAE internacionais se dividiram entre a adoção de um atuador elétrico do tipo solenoide, um atuador contendo um motor de corrente contínua e um atuador pneumático do tipo cilindro de dupla ação. O motor de corrente contínua foi adotado por ser o de aplicação mais simples - como será visto adiante -, não requerendo cilindro de gás - que exigiria recargas periódicas -, por ser possível controlar com alguma precisão a posição da alavanca de câmbio, por estar disponível facilmente e a um custo baixo no mercado e por estar disponível na oficina da equipe.

O tempo dedicado ao projeto variou conforme as atividades demandadas pelas lideranças da equipe e conforme os horários disponíveis complementando as disciplinas de cada período letivo, com muitas atividades também sendo desenvolvidas à noite e nos finais de semana.

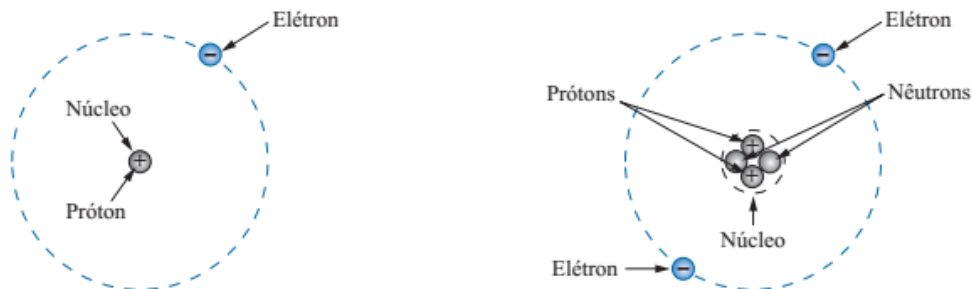
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CIRCUITOS ELÉTRICOS

2.1.1 Tensão e Corrente Elétrica

A origem da eletricidade está na natureza dos átomos e seus componentes. Os átomos são as estruturas fundamentais da matéria como é conhecida e são formados por elétrons, prótons e nêutrons. Os prótons e os nêutrons se localizam no interior do núcleo atômico, enquanto os elétrons se distribuem em camadas, orbitando o núcleo atômico, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Átomo de hidrogênio à esquerda e átomo de hélio a direita.



Fonte: (BOYLESTAD, 2012, p. 25)

Os elétrons e os prótons possuem cargas iguais em módulo. Convencionou-se que os prótons possuem cargas positivas e os elétrons cargas negativas. Essa distinção entre a natureza dessas cargas tem origem na interação observada entre esses dois componentes – os elétrons e os prótons se atraem enquanto dois elétrons se repelem com uma força denominada de força elétrica.

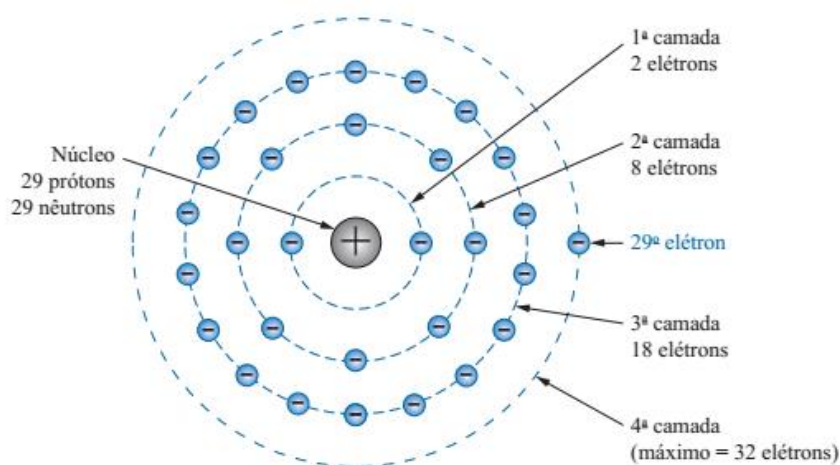
$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad (1)$$

Onde F é a força elétrica dada em newtons (N), k é a constante elétrica dada em m^2/C^2 , Q_1 e Q_2 são as cargas elétricas, dadas em Coulomb (C), e r é a distância entre as duas cargas, dada em metros (m).

A distribuição em camadas observada nos átomos acontece em quantidades limitadas para cada camada. A primeira camada por exemplo, suporta até dois elétrons, enquanto a

segunda suporta no máximo oito, como pode ser visto na Figura 3. Devido à natureza dessa distribuição, os átomos que possuem uma quantidade de elétrons próxima de completar a sua camada de valência – isso é, a sua última camada – são predispostos a receberem elétrons para completar essa camada e, por essa razão, são classificados como átomos eletronegativos. Enquanto que os átomos que possuem poucos elétrons nas suas camadas de valência, são predispostos a perder esses elétrons e são classificados como átomos eletropositivos.

Figura 3 - Representação de um átomo.

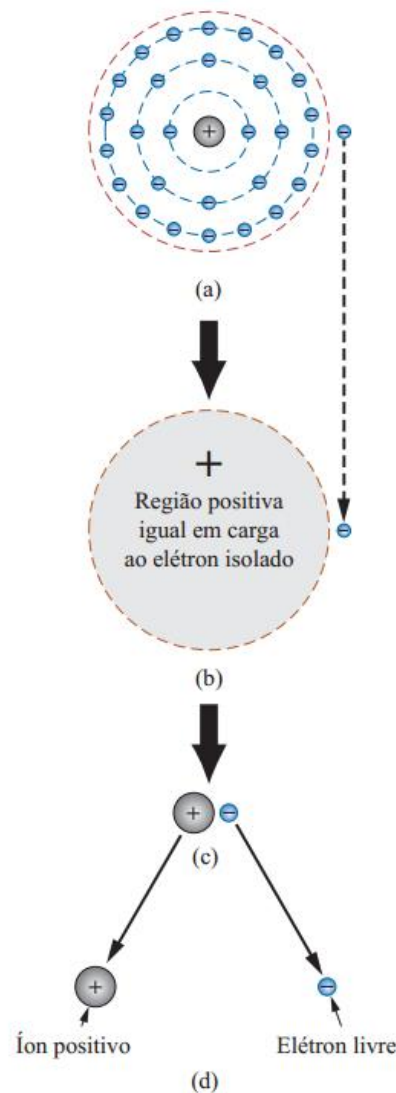


Fonte: (BOYLESTAD, 2012, p. 25)

Tomando como exemplo o átomo representado pela Figura 3, observamos que a sua camada de valência porta apenas um elétron. Dessa forma, podemos tomar a região do átomo com todas as suas orbitas preenchidas por elétrons como uma região eletricamente positiva – pois possui um número de prótons superior ao número de elétrons – enquanto o elétron da última camada como um elétron livre, ou uma carga negativa.

Ao separar-se o elétron livre do seu átomo de origem, Figura 4, teremos uma carga negativa representada pelo elétron e uma carga positiva representada pelo íon positivo. Dessa forma, teremos, entre eles, uma diferença de potencial elétrico, isso é, uma tensão elétrica (V).

Figura 4 - Íons e elétrons livres.



Fonte: (BOYLESTAD, 2012, p. 26)

Segundo Boylestad (2012, p. 27), “toda fonte de tensão é estabelecida com a simples criação de uma separação de cargas positivas e negativas”, dessa forma, podemos tomar toda fonte de tensão, como baterias, pilhas e tomadas elétricas, como a separação entre cargas positivas e negativas.

Para representar quantitativamente a diferença de potencial elétrico observada entre duas cargas elétricas, foi criada a unidade de tensão elétrica Volt (V), Equação (2). Nas palavras de Boylestad (2012, p. 27) “Se um total de 1 joule (J) de energia é usado para mover a carga negativa de 1 coulomb (C), há uma diferença de potencial de 1 volt (V) entre os dois pontos”.

$$V = \frac{W}{Q} \quad (2)$$

Onde a energia (W) é dada em joules (J), a carga elétrica (Q) é dado em coulombs (C) e a tensão elétrica (V) é dada em volts (V).

A diferença de potencial elétrico entre dois pontos representa a tendência que os elétrons possuem de se deslocar no sentido de balancear essa diferença de potencial para um valor nulo. Para que haja o deslocamento desses elétrons, é preciso que haja um meio propício. O meio comumente observado são os materiais possuidores de uma grande quantidade de elétrons livres, também chamados de materiais condutores de eletricidade.

Quando não há uma fonte de tensão entre os terminais de um condutor de eletricidade, os elétrons livres estão em constante movimento ao longo desse condutor, em sentidos variados. A soma do fluxo de elétrons se deslocando em todos os sentidos nesse material é nula. Quando há uma diferença de potencial nos terminais desse condutor, teremos o deslocamento líquido de elétrons diferente de zero e, portanto, uma corrente elétrica.

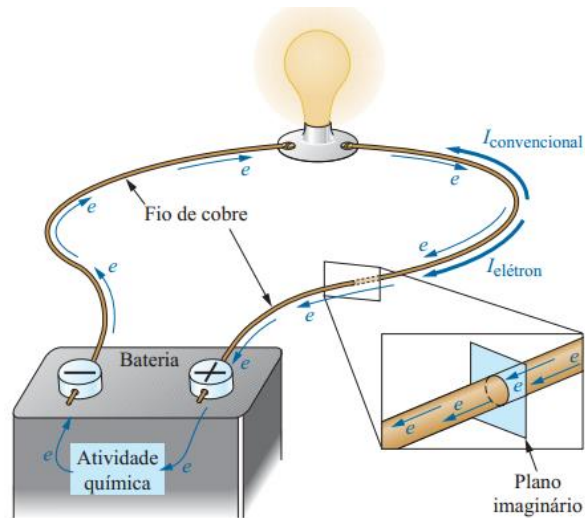
Conforme Boylestad (2012, p. 29), “Se $6,242 \times 10^{18}$ elétrons (1 coulomb) passam através do plano imaginário na Figura 5 em 1 segundo, diz-se que o fluxo de carga, ou corrente, é de 1 ampère (A)”. De fato, a unidade de medida dedicada para representar a corrente elétrica é o Ampere (A) e ela relaciona a quantidade de cargas Q deslocadas na seção de um condutor por unidade de tempo t , conforme a Equação (3).

$$I = \frac{Q}{t} \quad (3)$$

Onde I é a corrente elétrica em amperes (A), Q é a carga elétrica dada em coulombs (C), e t é o tempo dado em segundos (s).

O sentido em que os elétrons se deslocam, quando submetidos a uma tensão elétrica, é do polo negativo para o polo positivo da fonte de tensão. No entanto, como os elétrons são possuidores de cargas negativas, convencionou-se que o sentido da corrente elétrica parte do polo positivo para o polo negativo da fonte de tensão, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Corrente real e convencional de um circuito elétrico.

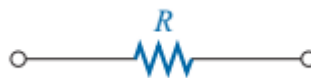


Fonte: (BOYLESTAD, 2012, p. 29)

2.1.2 Resistência

Nos circuitos elétricos, a fonte de tensão induz uma corrente elétrica através de um condutor e uma carga. No entanto, a maioria dos materiais resistem a esse fluxo de elétrons. Essa característica é chamada de resistência elétrica e tem como símbolo a letra grega ohm (Ω). Nos circuitos elétricos, a resistência é simbolizada como na Figura 6.

Figura 6 - Símbolo da resistência elétrica.



Fonte: (BOYLESTAD, 2012, p. 51)

A resistência elétrica dos materiais está relacionada com a resistividade específica dos materiais, o coeficiente de temperatura, o comprimento, área do corte transversal e a temperatura. As primeiras se relacionam como na Equação (4).

$$R = \rho \frac{l}{A} [1 + \alpha_{20} \Delta T] \quad (4)$$

Onde a resistência (R) é dada em ohms (Ω), o comprimento (l) é dado em pés, a área (A) é dada em mils circulares (CM)², a resistividade (ρ) é dada em CM- Ω /pés à temperatura de 20°C, o coeficiente de temperatura (α_{20}) é dado em °C⁻¹ e a variação ΔT de temperatura com relação à 20°C é dado em °C. A Tabela 1 apresenta valores de resistividade e coeficientes de temperatura para vários materiais.

Tabela 1 – Resistividade e coeficiente de temperatura de vários materiais.

Material	ρ (CM- Ω /pés) à 20°C	Coeficiente de temperatura (α_{20})
Prata	9,9	0,0038
Cobre	10,37	0,00393
Ouro	14,7	0,0034
Alumínio	17,0	0,00391
Tungstênio	33,0	0,005
Níquel	47,0	0,006
Ferro	74,0	0,0055
Constantan	295,0	0,000008
Nicromo	600,0	0,00044

Fonte: Dados extraídos da Tabela 3.1 e Tabela 3.4 em (BOYLESTAD, 2012, p. 52 e 59)

2.1.3 Lei de Ohm

A lei de Ohm relaciona a corrente, tensão e resistência num circuito elétrico. Ela estabelece que a corrente fluindo por um resistor, em ampères, é igual a razão entre a tensão aplicada nos terminais desse resistor, em volts, e a sua resistência, em ohms, na forma da Equação (5). Essa equação pode ser manipulada algebricamente para se determinar a tensão ou a resistência de qualquer dispositivo.

$$I = \frac{V}{R} \quad (5)$$

² A unidade mils circulares (CM) é utilizada na maioria das tabelas de fios comerciais. Ela se relaciona com a unidade polegada na forma $1.000 \text{ mils} = 1 \text{ pol.}$ Um fio de diâmetro de 1 mil possui uma área de 1 mil circular (CM). (BOYLESTAD, 2012, p. 52)

A potência demandada por um dispositivo, isso é, a taxa de energia consumida por um dispositivo com relação ao tempo, é representada pela letra P , dada em Watt (W) e se relaciona com o trabalho, dado em joules, e o tempo, em segundos, na forma da Equação (6).

$$P = \frac{W}{t} \quad (6)$$

Num circuito elétrico, a potência demandada por um dispositivo é dada pelo produto da tensão nos terminais desse dispositivo pela corrente que flui por esse dispositivo, na forma da Equação (7).

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

Aplicando a equação da lei de Ohm na Equação (7), é possível encontrar outras relações para a determinar a potência demandada por um dispositivo, como nas equações (8) e (9).

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (8)$$

$$P = RI^2 \quad (9)$$

2.1.4 Circuitos em Série e Paralelo

De maneira geral, os resistores podem ser associados em série, onde uma única corrente passa por todos os resistores, em paralelo, onde a tensão entre os resistores é a mesma e a corrente é dividida entre eles, ou em ponte, onde a análise do circuito é um tanto mais complexa. Para o propósito desse trabalho, iremos analisar os circuitos série e paralelo.

Resistências associadas em série podem ser tratadas como uma resistência equivalente onde seu valor resulta da soma de todas as resistências em série. Dessa forma, como na Equação (10).

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (10)$$

Quando associados em paralelo, o inverso da resistência equivalente assume o valor da soma dos inversos das resistências em paralelo. Dessa forma, como na Equação (11).

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (11)$$

2.1.5 Condutores e Isolantes

Os condutores utilizados na maioria dos circuitos elétricos são compostos por ligas de cobre e ligas de alumínio. Além desses, temos a prata e o ouro, utilizado em aplicações específicas, onde a condutividade elétrica e a resistência a corrosão são fatores críticos de projeto. Na Tabela 2 podemos ver a condutividade elétrica de alguns materiais relativo a condutividade do cobre, que é o material mais utilizado na fabricação de fios, cabos e trilhas de placas de circuito impresso, como será visto adiante.

Tabela 2 – Condutividade relativa de vários materiais.

Metal	Condutividade relativa ao cobre (%)
Prata	105
Cobre	100
Ouro	70
Alumínio	61
Tungstênio	31,2
Níquel	22,1
Ferro	14
Constantan	3,52
Nicromo	1,73
Calorita	1,44

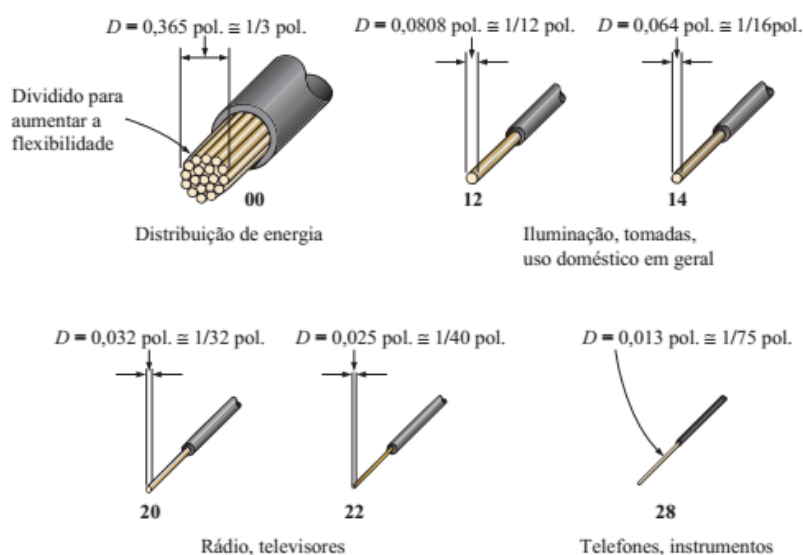
Fonte: Dados extraídos da Tabela 2.1 em (BOYLESTAD, 2012, p. 41)

Os fios são condutores maciços e rígidos enquanto os cabos possuem mais de um fio em seu interior e são flexíveis. Os cabos e fios mais comuns são feitos em liga de cobre ou liga de alumínio e possuem um revestimento isolante elétrico. A Figura 7 ilustra a diferença entre esses condutores.

Para a correta seleção desses condutores, é preciso saber o valor da corrente elétrica a ser conduzida, a temperatura ambiente e o espaço disponível para comportá-los. Com essas informações, pode-se realizar a consulta numa tabela³ de cabos e fios padronizados e selecionar o condutor mais apropriado.

Em alguns casos específicos, como em veículos de competição automotiva, a massa dos cabos é um fator a ser mitigado com o intuito de diminuir o peso do veículo. Para tanto, é comum o uso de cabos de alumínio com coberturas de isolamento menos espesas que os cabos usados em instalações prediais, por exemplo.

Figura 7 - Cabos e fios.



Fonte: (BOYLESTAD, 2012, p. 55)

Nas palavras de Boylestad (2012, p. 40), “Os isolantes são materiais que possuem pouquíssimos elétrons livres, sendo necessária a aplicação de um potencial (uma tensão) muito elevada para estabelecer uma corrente mensurável.”. Os isolantes mais comuns, são os encapamentos de fios e cabos condutores.

Para cabos flexíveis, de instalação predial, consultando-se o catálogo de um fabricante nacional é possível encontrar os valores referentes a resistividade elétrica com relação ao diâmetro do condutor. Esses valores são apresentados na Tabela 3

³ Mais informações são apresentadas na Tabela 3.2 – Dimensões AWG (American Wire Gage) em (BOYLESTAD, 2012, p. 56).

Tabela 3 – Resistência elétrica de cabos flexíveis de instalações prediais.

Classe 4 – Condutores flexíveis para cabos unipolares e multipolares.		
Seção nominal (mm ²)	Diâmetro máximo dos fios no condutor (mm)	Resistência máxima do condutor a 20° C
		Fios nus (Ω/km)
0,5	0,31	39,0
0,75	0,31	26,00
1	0,31	19,50
1,5	0,41	13,30
2,5	0,41	7,98
4	0,51	4,95

Fonte: Valores extraídos da Tabela 3 do documento de informações e tabelas técnicas da empresa NAMBEI, <<http://www.nambei.com.br/download/tabela-tecnica.pdf>>, consultado em 26 de novembro de 2018.

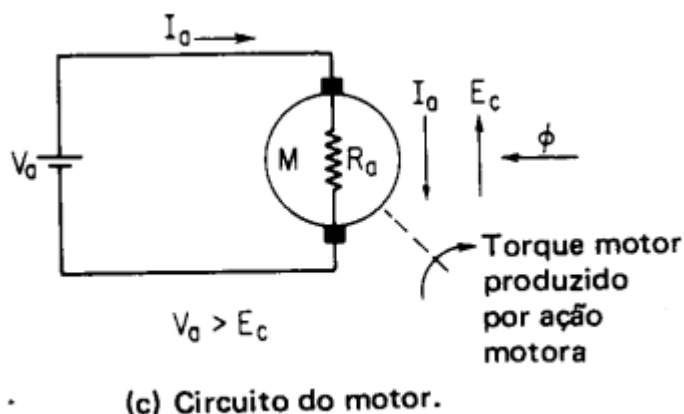
2.2 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA E IMÃS PERMANENTES

Os motores de corrente contínua escovados de imãs permanentes são motores largamente utilizados em veículos automotores, máquinas e ferramentas elétricas. Como exemplos, podemos citar os motores de partida de motocicletas, motores de vidro elétrico, motores de ventoinhas de radiadores, motores de parafusadeiras e outras ferramentas portáteis, entre outros.

Para o propósito desse trabalho, convém apenas introduzir o modelo simplificado desse motor, representado na Figura 8, para realizar o dimensionamento dos seus cabos e conectores. Para tanto, como informa Kosow (1982, p. 30), o modelamento elétrico para motores de corrente contínua e imãs permanentes é ilustrado na Figura 8 e equacionado na Equação (12), onde V_a representa a tensão aplicada no motor, E_c é a tensão gerada no motor devido a sua rotação, também chamada de força contra eletromotriz, I_a é a corrente que percorre a armadura do motor e R_a é a resistência da armadura.

$$V_a = E_c + I_a R_a \quad (12)$$

Figura 8 - Modelo do motor de corrente contínua e ímãs permanentes.



Fonte: (KOSOW, 1982, p. 30)

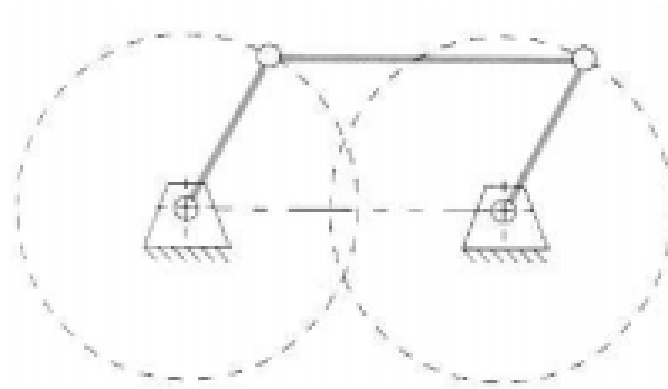
2.3 MECANISMO DE QUATRO BARRAS

Para o propósito desse trabalho, convém citar o mecanismo de quatro barras pois este é usado como conjunto de transmissão de torque entre dois eixos. Nas palavras de Norton,

“Simplicidade é uma das marcas de um bom projeto. A menor quantidade de peças que podem realizar um trabalho geralmente fornece a solução mais barata e confiável. Além disso, o mecanismo de quatro barras deve estar entre as primeiras soluções para o problema de controle de movimento a serem investigadas.” (NORTON, 2010, p. 74).

O mecanismo de quatro barras em questão é um mecanismo composto por três barras e duas articulações fixas. Como a distância entre as duas articulações fixas é constante, subentende-se que a mesma pode ser tratada como a quarta barra do mecanismo. Para o caso desse trabalho, o mecanismo abordado é da forma de um retângulo que, ao movimentar-se, assume a forma de um paralelogramo, conforme Figura 9.

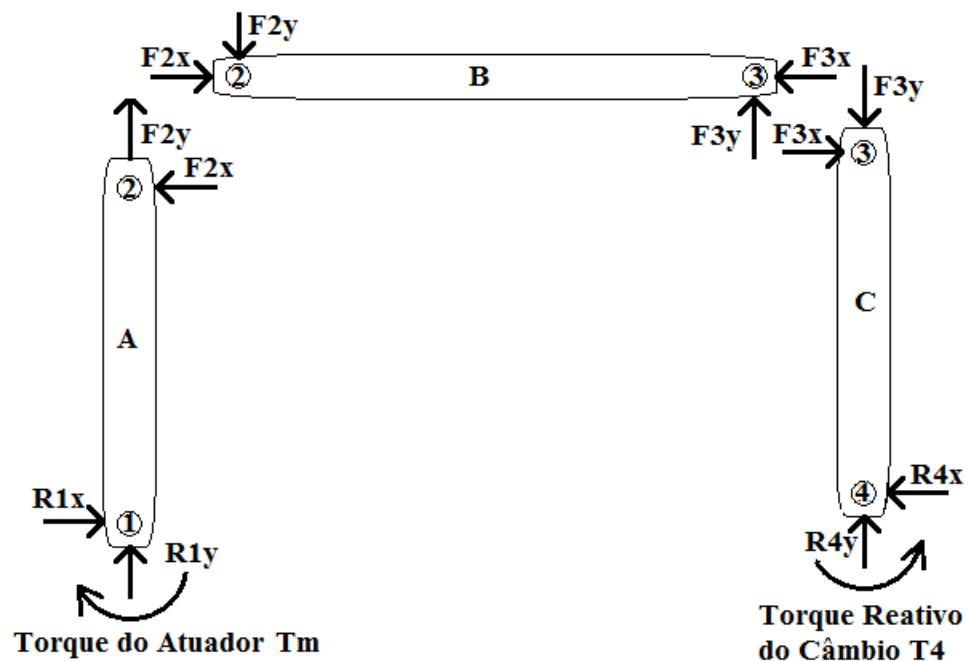
Figura 9 - Mecanismo de quatro barras em forma de paralelogramo.



Fonte: (NORTON, 2010, p. 77)

Tomando-se como condição inicial do mecanismo o formato retangular, Figura 10, com ângulos de noventa graus entre todas as barras, e para pequenos ângulos de articulação, o torque transmitido entre as duas barras pinadas nas juntas fixas é o mesmo. Esse mecanismo é usado no presente trabalho para transmitir o torque do atuador para o eixo da alavanca de câmbio de um motor a combustão.

Figura 10 - Mecanismo de quatro barras na forma de um retângulo.



Fonte: Próprio autor.

2.4 BREVE HISTÓRIA DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Os sistemas de transmissão de movimento são mecanismos usados para converter torque, força e velocidade de motores e acionadores para valores desejados. Para o propósito desse trabalho, iremos tratar dos sistemas de transmissão veiculares.

Não é conhecido quando o primeiro sistema de transmissão de movimento foi inventado pelo homem. Naunheimer (2010, p. 7) apresenta uma lista de inovações precursoras das transmissões automotivas. O primeiro relato apresentado é de uma carroça desenhada em um vaso da Mesopotâmia datando de 4000 AC.

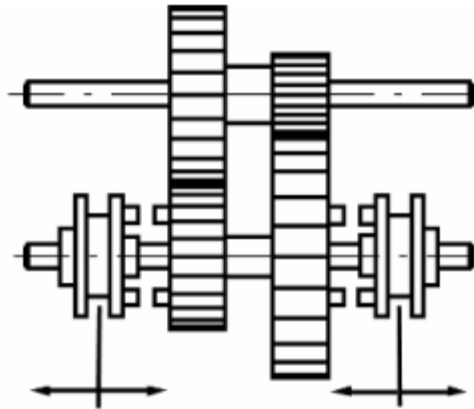
Como expressa Naunheimer (2010, p. 1) “All vehicles, aircraft and watercraft included, require transmissions in order to convert torque and engine speed.”⁴ Dessa forma, ao longo da história, o desenvolvimento dos sistemas de transmissão está intimamente relacionados ao desenvolvimento de aviões, veículos e embarcações motorizadas.

Uma cronologia de estágios de desenvolvimentos importantes de transmissões veiculares é, também, apresentada por Naunheimer (2010, p. 12). Dentre essas contribuições, para o escopo desse trabalho, podemos citar a transmissão de James Watt, em 1784, representada na Figura 11, que consistiu de uma caixa de engrenagens com velocidades variáveis, acoplamento de engrenagens cachorro e engrenagens constantemente engrazadas, a transmissão de Griffith, em 1821, ilustrada na Figura 12, com duas velocidades e engrenagens deslizantes, a transmissão de Selden, em 1879, apresentada na Figura 13, com engrenagens deslizantes, engrenagem de reversão e embreagem, a transmissão de Maybach-Daimler, em 1889, com quatro velocidades e engrenagens deslizantes, a transmissão de Peugeot, em 1890, também com engrenagens deslizantes, entre outras.

É importante ressaltar que alguns desses conceitos permanecem em uso ainda hoje nos veículos comerciais, como carros e motocicletas. O sistema de caixa com velocidades variáveis, engrenagens constantemente engrazadas, engrenagens deslizantes e acoplamento por engrenagens cachorro são largamente utilizados em caixas de transmissão de motocicletas de passeio e esportivas.

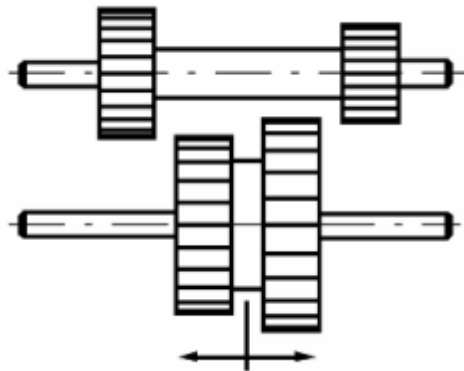
⁴ Todos os veículos, aviões e embarcações necessitam de transmissões para converter torque e velocidade de seus motores. (NAUNHEIMER, 2011, p. 1)

Figura 11 - Patente de James Watt de 1784. Caixa de engrenagens de duas velocidades com engajamento por engrenagens cachorro.



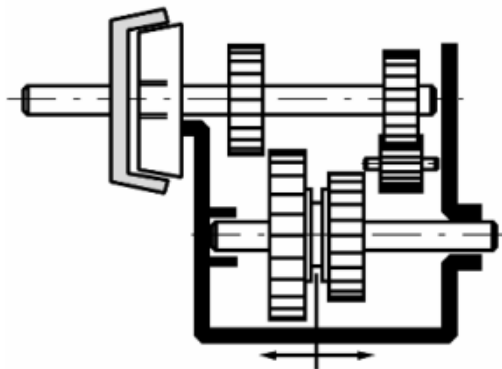
Fonte: Naunheimer (2010, p. 15).

Figura 12 - Caixa de engrenagens de Griffith de 1821, com duas velocidades e engrenagens deslizantes.



Fonte: Naunheimer (2010, p. 15).

Figura 13 - Transmissão de Selden, 1879, com embreagem, engrenagem de reversão e caixa fechada.



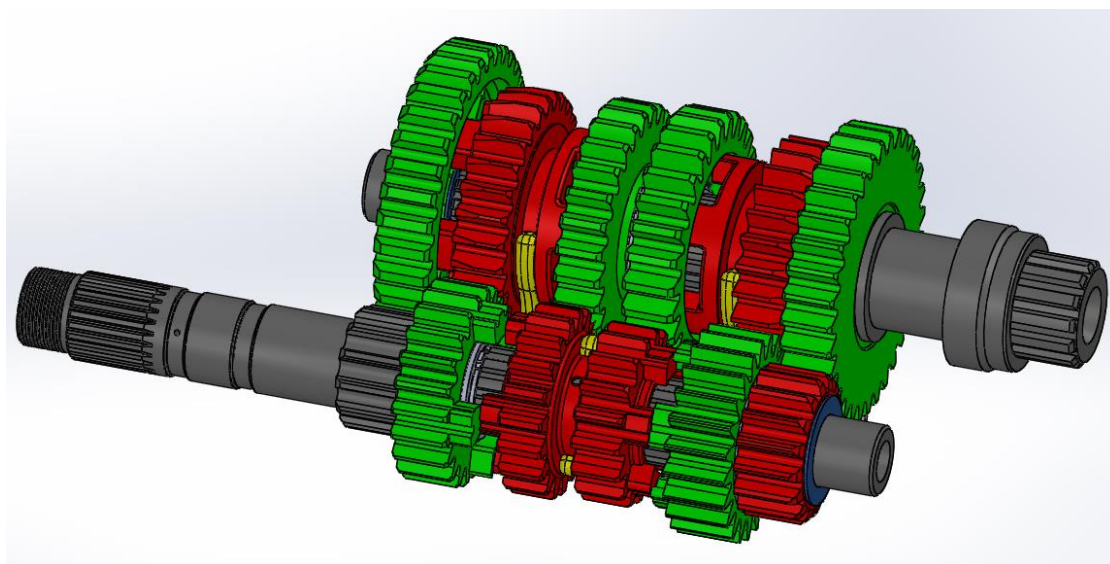
Fonte: Naunheimer (2010, p. 15).

2.5 SISTEMA DE CÂMBIO DE MOTOCICLETAS

O sistema de câmbio de motocicletas mais comum é do tipo sequencial e consiste de alguns pares de engrenagens concentradas em dois eixos – eixo primário e eixo secundário –, constantemente engrazadas. Para cada par de engrenagens, uma deverá estar constantemente acoplada ao seu eixo. A engrenagem que gira livre com relação ao seu eixo é engatada ao mesmo com o uso de engrenagens do tipo cachorro. Com esse engate, é garantido que um eixo transmita torque ao outro com a relação determinada pelo número de dentes do par de engrenagens acopladas nesse momento.

Na Figura 14, é possível observar os pares de engrenagens concentradas no eixo primário (acima) e eixo secundário (abaixo). As engrenagens destacadas em verde podem girar livremente com relação aos seus respectivos eixos. As engrenagens em vermelho possuem estrias nos seus furos centrais e, portanto, estão sempre acopladas, girando em sincronia com os seus respectivos eixos. As engrenagens vermelhas podem ser deslocadas lateralmente para realizar o acoplamento das engrenagens verdes aos seus eixos, promovendo o engate da marcha desejada.

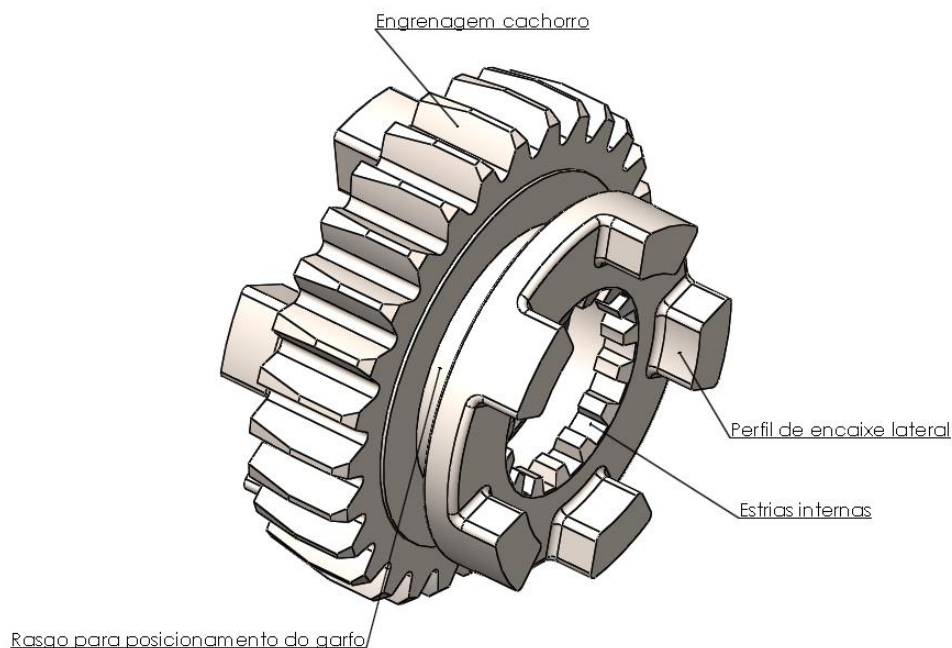
Figura 14 - Transmissão da moto Honda CBR600



Fonte: Próprio autor

A engrenagem do tipo cachorro, ilustrada na Figura 15, geralmente, está sempre acoplada ao eixo. Essa engrenagem é acoplada ao eixo por estrias, o que permite o seu deslizamento axial, e possui um perfil de encaixe lateral. Esse deslizamento é feito para acoplar ao eixo a engrenagem que está girando livre com relação ao eixo.

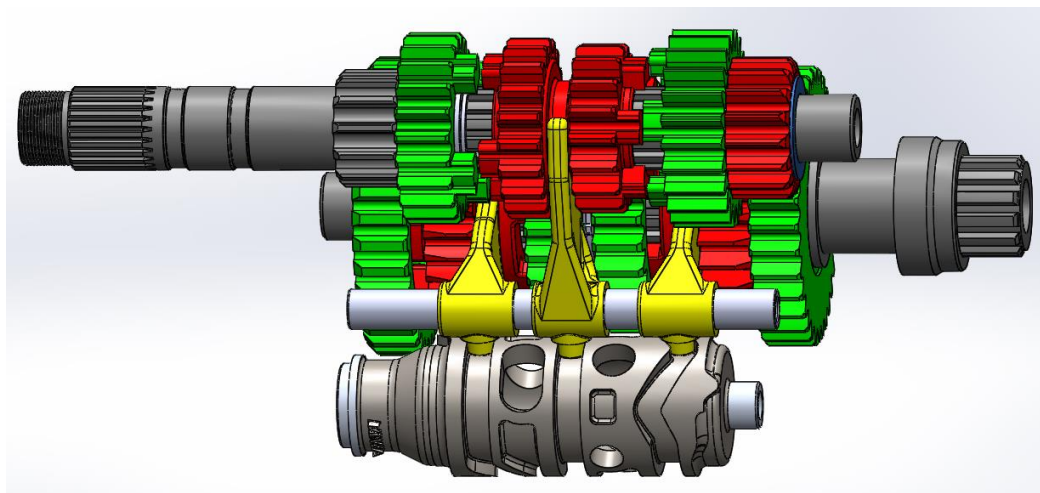
Figura 15 - Engrenagem cachorro.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 16, é possível observar que o deslizamento da engrenagem cachorro é feito com o uso dos garfos, ilustrados em amarelo, e esses, por sua vez, são deslocados com o uso de um trambulador. O trambulador é uma peça cilíndrica contendo rasgos na sua face cilíndrica com perfis específicos para conduzir os garfos e acoplar as marchas conforme a sua rotação, e o mesmo é rotacionado com o uso de uma alavanca de pedal. O trambulador original da moto CBR600rr é ilustrado na Figura 17.

Figura 16 - Transmissão da moto Honda CBR 600 (vista do trambulador).



Fonte: Próprio autor.

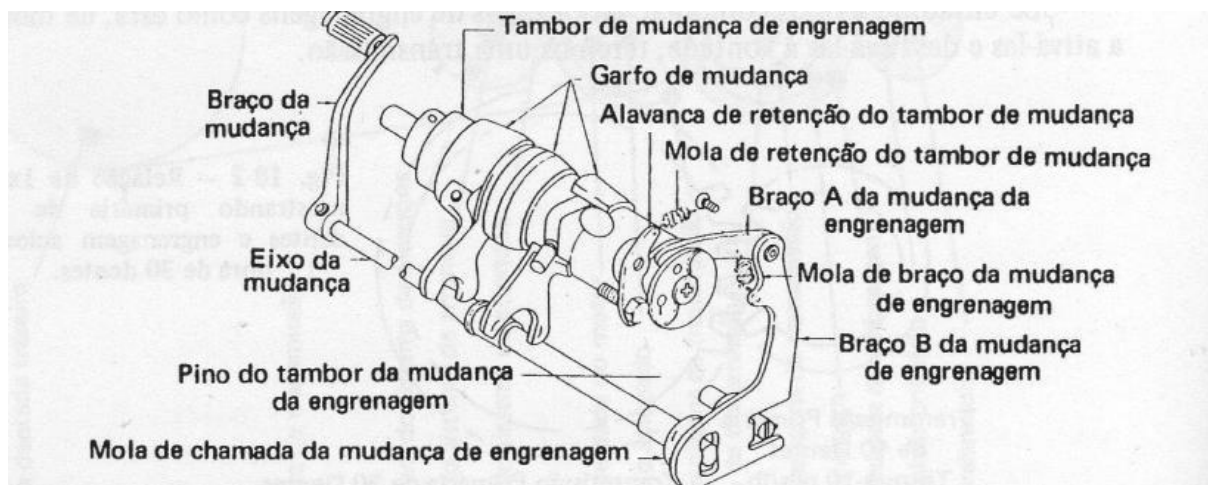
Figura 17 - Trambulador da moto Honda CBR600RR



Fonte: Autor não identificado.

O giro do trambulador, Figura 18, é feito com o auxílio de um mecanismo acionado por uma alavanca de pedal. Esse mecanismo converte o deslocamento da alavanca do pedal no giro do trambulador até uma certa posição angular, para cada marcha.

Figura 18 - Mecanismo de acionamento do trambulador.



Fonte: (LEAR e MOSHER, 1977).

2.6 AUTOMATIZAÇÃO DE CÂMBIOS SEQUENCIAIS

Não existe uma transição clara entre o desenvolvimento de transmissões manuais e automáticas para veículos comerciais. Em tese, todas as transmissões manuais (MT) de veículos comerciais podem ser automatizadas com o uso de atuadores.

No caso dos câmbios sequenciais, Naunheimer (2010, p. 494) apresenta a primeira caixa de marchas de produção em massa desenvolvida puramente como uma *Automated Manual Passenger Car Transmission*⁵ (AMT). Se trata de uma transmissão com seis

⁵ Transmissão Manual Automatizada para Carros de Passageiro (AMT)

velocidades, desenvolvida pela Getrag modelo Getrag 431 AMT. Essa transmissão foi introduzida no ano de 1998, nos veículos Smart Fortwo e Smart Roadster, Figura 19.

Figura 19 - Motor de um veículo Smart Fortwo com vista para o sistema de transmissão.

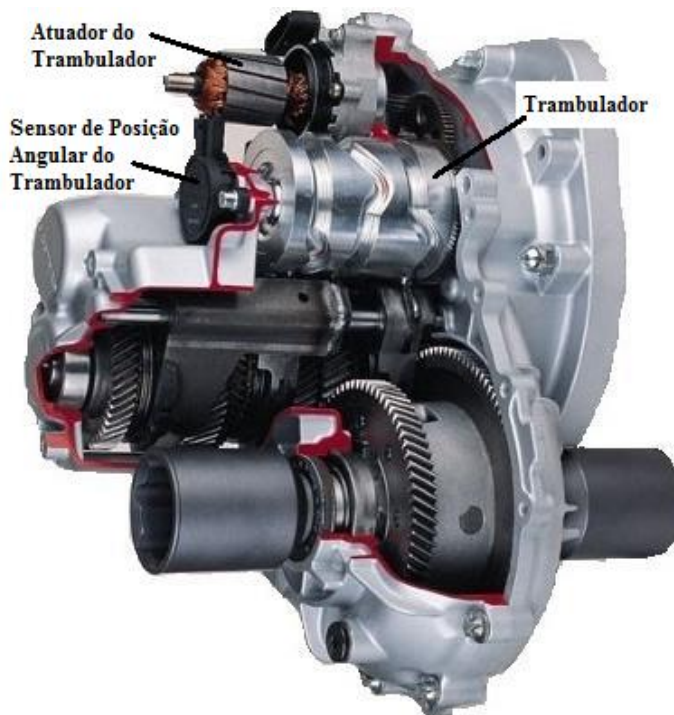


Imagem obtida do site do fornecedor de peças <<https://www.smart-stuff.parts/>>, em 03 de junho de 2018.

O atuador utilizado para o acionamento da marcha na transmissão Getrag 451 – um modelo mais novo do sistema exposto anteriormente – é um motor de corrente contínua, Figura 20. O sistema faz uso de um trem de engrenagens para conseguir um torque mais elevado para o acionamento do trambulador. Esse mecanismo é apresentado na Figura 21.

Figura 20 – Motor servo Smart-Original para veículo Smart Fortwo 451.



Fonte: Imagem obtida do site do fornecedor de componentes <<https://oe-autoteile-shop.com/Smart-Original-Gearbox-servomotor-Smart-Fortwo-451-A4518290201/en>>, em 03 de junho de 2018.

Figura 21 - Mecanismo de acionamento da transmissão Getrag 431. Em (1), vemos atuador elétrico; (2), o trambulador e (3), os garfos.



Fonte: Naunheimer (2010, p. 496).

2.7 AUTOMATIZAÇÃO DE CÂMBIOS E VEÍCULOS DE FORMULA SAE

A automatização de câmbios em veículos do tipo Formula SAE é algo que se tornou muito comum. No Brasil, podemos citar equipes como a FSAE UNICAMP, que faz uso de um atuador do tipo solenoide para acionar a alavanca de câmbio. A equipe Formula Cefast, que faz uso de um sistema eletropneumático, onde a alavanca de câmbio é acionada por um cilindro pneumático de dupla ação, entre outros exemplos.

Devido ao caráter de competitividade que esses equipamentos trazem para as equipes, é difícil encontrar dados de desempenho desses sistemas usados pelas equipes nacionais. No entanto, no cenário internacional podemos encontrar alguns estudos elaborados sobre o projeto e o desempenho desses equipamentos.

Conforme Chalmela (2017, p. 4), a equipe UTA Racing projetou e substituiu o seu sistema de acionamento manual da alavanca de câmbio por um sistema eletropneumático e o sistema de acionamento manual da embreagem por um servomecanismo. No sistema desenvolvido, o acionamento da alavanca de câmbio sequencial é acionado por um cilindro de dupla ação, este, por sua vez, acionado por eletrovalvulas controladas por um microcontrolador. O sistema adotado pela equipe, apesar de necessitar de um cilindro de dióxido de carbono

pressurizado para alimentá-lo, reduziu o tempo de passagem de marcha médio de um valor de 150 milissegundos para 75 milissegundos.

Nas palavras de Kennett (2008), semelhantemente a equipe UTA Racing, a equipe MIT Motorsport optou pelo uso de um sistema pneumático para o acionamento da alavanca de câmbio, o que apresentou um tempo médio de 200 milissegundos no avanço da marcha. As reduções de marcha apresentaram um desempenho inferior ao avanço devido ao uso necessário da embreagem. Essa, por sua vez, foi projetada como uma alavanca de acionamento manual atrás do volante.

Conforme Ajirogi, *et al.* (2011), a equipe Berkeley Formula Racing optou pelo uso de um atuador do tipo solenoide de dupla ação e obteve uma melhora no tempo de troca de marcha de 16,7%, de 204 milissegundos para 170 milissegundos, com relação a alavanca de uso manual.

Além dos sistemas desenvolvidos pelas próprias equipes, existem alguns sistemas de câmbio eletrônicos comercializados que cabem aqui destacar. Dentre eles, podemos citar o sistema Flatshifter Max, da empresa Flatshifter, Figura 22, que faz uso de uma solenoide de dupla ação, e podemos citar o sistema Geartronics Paddleshift, da empresa Geartronics, Figura 23, que faz uso de um cilindro pneumático de dupla ação para acionar a alavanca de câmbio, um cilindro de ação simples para acionar a embreagem, dentre outros componentes que controlam e dão suporte ao sistema.

Figura 22 - Sistema Flatshifter Max instalado numa motocicleta.



Fonte: Retirado do site da fabricante Flatshifter <<https://www.flatshifter.com/flatshifter-max-electronic-gear-selector-kit/>>, em 03 de junho de 2017.

Figura 23 - Sistema Geartronics Paddleshift para acionamento eletrônico da marcha e da embreagem.



Fonte: Retirado do site da fabricante Geartronics <<http://www.geartronics.co.uk/paddleshift.htm>>, em 03 de junho de 2018.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada para o desenvolvimento do projeto partiu da exposição do problema, que é a dificuldade enfrentada pelo piloto no acionamento da marcha manual do veículo, requerendo que a mão esquerda do mesmo soltasse o volante para realizar esse acionamento em uma alavanca e o elevado tempo requerido para essa tarefa.

Os requisitos adotados para a troca de marcha foi que a solução partisse do desenvolvimento de um sistema de troca de marcha semiautomatizado próprio da equipe, para obter pontuações de projeto na competição, que fizesse uso de um atuador elétrico, evitando-se o uso de um compressor ou de um cilindro de gás com recargas periódicas, que fosse economicamente viável de ser realizado pela equipe e que fosse confiável.

3.1 MEDIÇÕES INICIAIS

O conceito a ser testado foi de um motor de parafusadeira com um sistema de redução e um mecanismo de quatro barras acionando a alavanca de câmbio. Para selecionar a redução foi preciso medir o torque necessário para acionar a alavanca de câmbio e selecionar o motor.

Como a equipe e a oficina não possuíam um torquímetro apropriado para a medição do torque de acionamento da alavanca de câmbio e o manual de serviços técnicos da moto a qual o motor pertencia não disponibilizava essa informação, foi preciso realizar a medição de forma improvisada, adicionando-se peso à alavanca de câmbio até que a mesma fosse acionada, medindo o peso necessário para isso e multiplicando-o pela componente horizontal do comprimento da alavanca de câmbio, como registrado na Figura 25.

A balança utilizada para essa medição foi uma balança eletrônica de precisão SF-400, com faixa nominal de 0-10,00kg, como ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Balança eletrônica de precisão SF-400.



Fonte: Imagem retirada do site da Lojas Americanas, no endereço: <https://images-americanas.b2w.io/produtos/01/00/oferta/22919/6/22919663_1SZ.jpg>, em 25 de novembro de 2015.

A massa adotada foi uma garrafa d'água amarrada a extremidade da alavanca de câmbio por um cabo de aço. A alavanca de câmbio foi instalada ao eixo do câmbio na horizontal para facilitar o cálculo. A água foi adicionada à garrafa até que a mesma conseguisse acionar a alavanca de câmbio. Foi observado que a massa necessária para acionar cada marcha foi aproximadamente a mesma. Após o acionamento a massa da garrafa foi medida numa balança.

Com as medidas da massa da garrafa e do comprimento da alavanca, o torque foi calculado multiplicando-se a massa da garrafa pela aceleração da gravidade e pelo comprimento da alavanca. O torque calculado foi de 6,05 Nm.

Figura 25 - Medição do torque necessário para acionar a alavanca de câmbio.



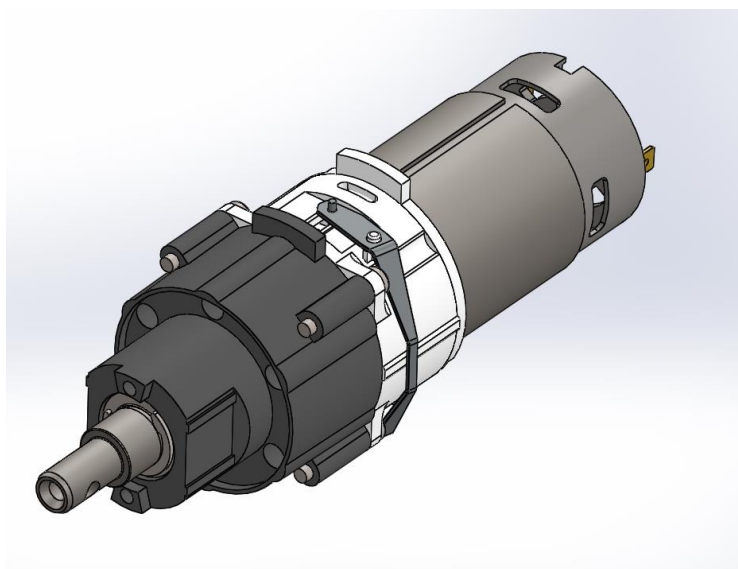
Fonte: Próprio autor

3.2 PROJETO DO ATUADOR ROTATIVO

Como o torque calculado era inferior ao torque informado no manual da parafusadeira Bosch GSR 14,4-2⁶, essa parafusadeira foi desmontada e o conjunto de motor e redução de engrenagens planetárias foi reaproveitado.

Ao extrair o conjunto da parafusadeira, observou-se que ela possuía um mecanismo limitador de torque. Esse mecanismo foi extraído e com alguns pequenos ajustes, o conjunto passou a exercer apenas a função de motor e redução planetária com duas opções de velocidade. Após esses ajustes, foi desmontado todo o conjunto e desenhado todas as peças no SolidWorks 2016, Figura 26 e Figura 27, para projetar uma nova carcaça para o conjunto.

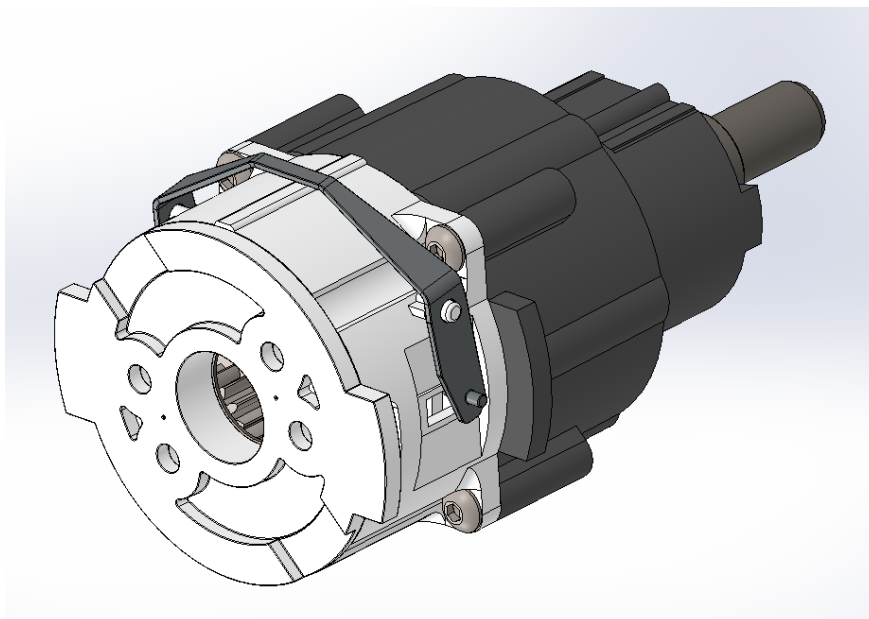
Figura 26 - Conjunto do motor e redução planetária com seletor de velocidades.



Fonte: Próprio autor

⁶ Informação encontrada no manual da parafusadeira Bosch GSR 14,4-2: <<http://www.bosch-professional.com/br/pt/cordless-drilldriver-gsr-14-4-2-226567-0601918gd0.html>>. Acessado em 27 de Fevereiro de 2018.

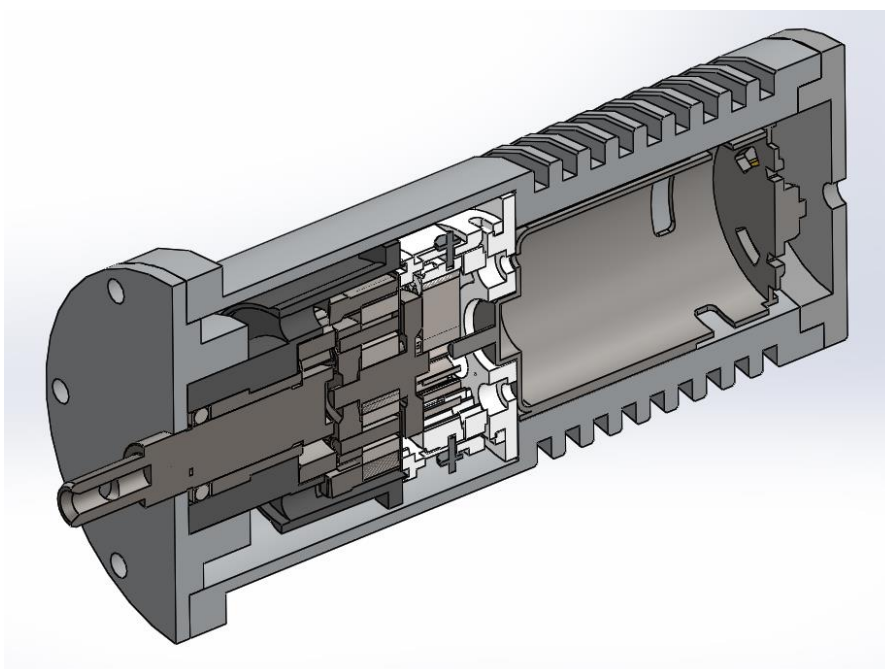
Figura 27 - Redução planetária com seletor de velocidades.



Fonte: Próprio autor

Com os desenhos do conjunto motor e redução planetária, o projeto da carcaça foi iniciado no SolidWorks 2016, apresentado na Figura 28, partindo de um tarugo de alumínio já disponível na oficina. Alguns detalhes de dimensões podem ser vistos no Apêndice A, B e C.

Figura 28 - Desenho da carcaça do atuador.

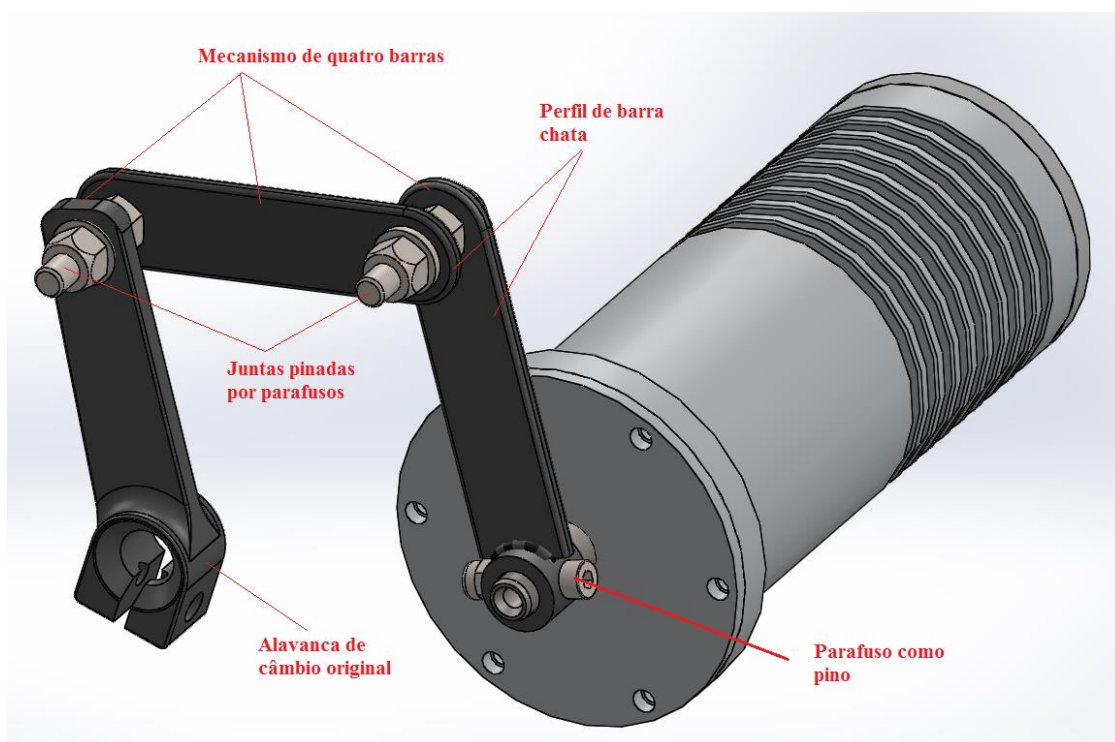


Fonte: Próprio autor

3.3 MECANISMO DE QUATRO BARRAS

Para transmitir o torque do eixo do atuador para o eixo da alavanca de câmbio do motor, foi projetado um mecanismo de quatro barras com relação de transmissão inicial unitária, ilustrado na Figura 29, partindo da modificação da alavanca de câmbio original do motor, reduzindo-se o seu comprimento. As outras barras foram projetadas de perfis de barras chata de aço de 3/8". Para as juntas, foram usados porcas com trava de náilon, arruelas e parafusos M6 como juntas pinadas e para fixar a alavanca do atuador, foi usado um parafuso e porca M4 como pino. Detalhes desse mecanismo podem ser vistos nos Apêndices E, F e G.

Figura 29 - Mecanismo de quatro barras como transmissão de torque.



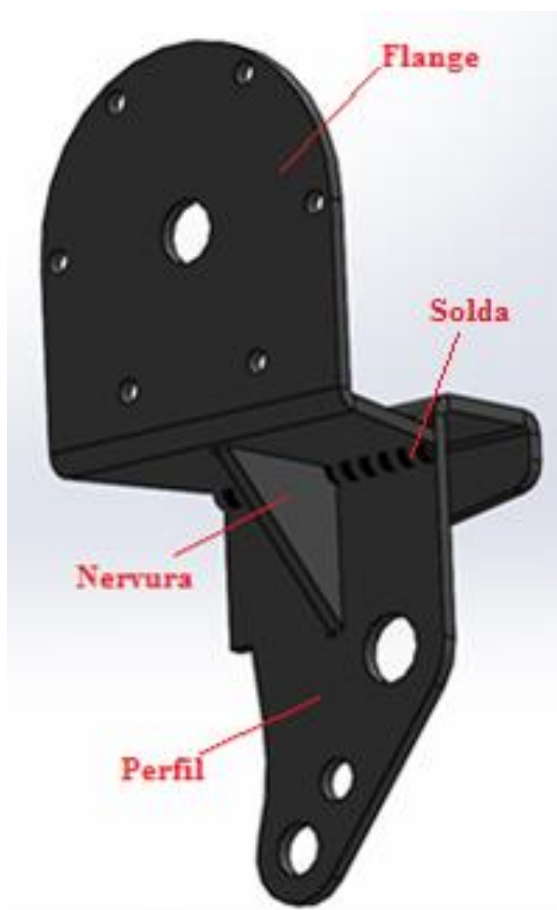
Fonte: Próprio autor

Para um primeiro modelo desse atuador, não foi feito nenhum estudo aprofundado das suas características de resistência mecânica. Ao invés disso, optou-se por projetar o modelo sobredimensionado e observar a sua performance em testes práticos, deixando o melhoramento do sistema, com redução de massa, para uma segunda ocasião.

3.4 SUPORTE DO ATUADOR

Para fixar o atuador ao motor, foi projetado um suporte em chapa de aço AISI 1010, de 3 mm de espessura, em três partes separadas e soldada, uma flange dobrada com seis furos para parafusos M3 para fixar a flange da carcaça, um perfil dobrado para fixar o suporte ao motor, e uma nervura para promover a resistência a flexão da flange soldada ao perfil. O suporte é apresentado na Figura 30. Alguns detalhes de dimensões podem ser vistos no Apêndice D.

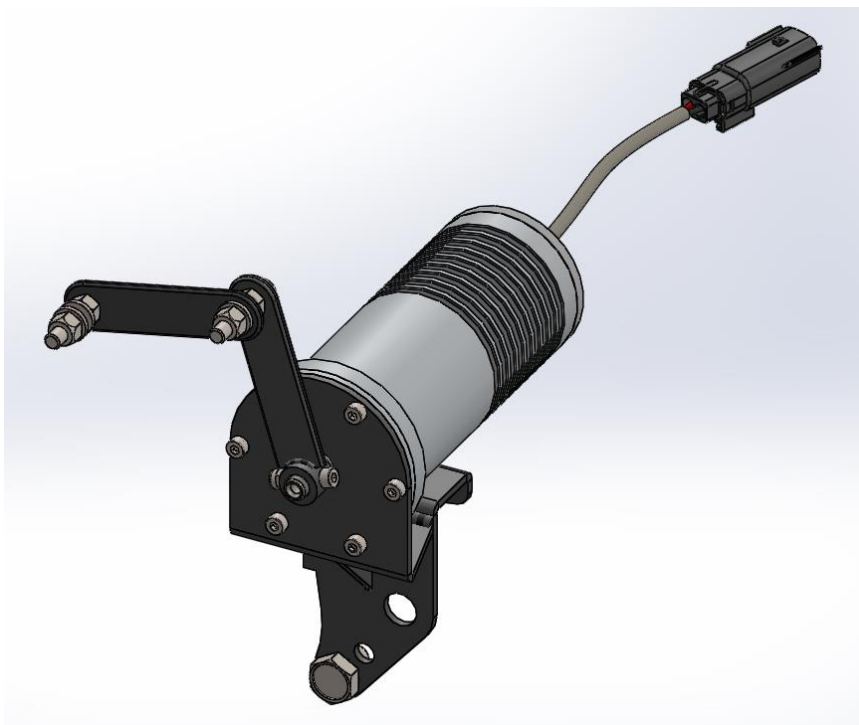
Figura 30 - Suporte com flange em chapa de aço.



Fonte: Próprio autor.

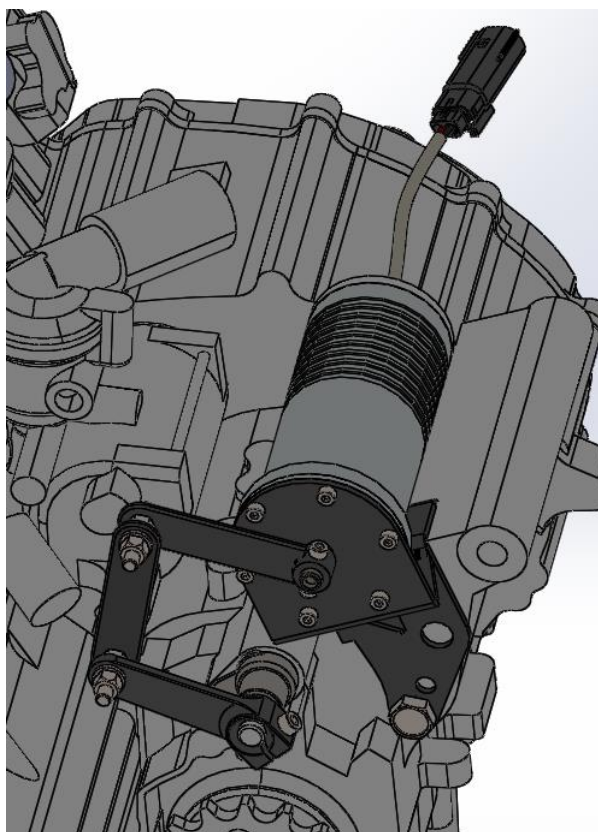
O suporte do atuador foi projetado de forma a aproximar o plano de ação do eixo do atuador ao plano de ação do eixo da alavanca de câmbio. Ilustração dessa relação na Figura 31 e Figura 32.

Figura 31 - Mecanismo com carcaça de alumínio e flange.



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 - Projeto do mecanismo instalado no motor.



Fonte: Próprio autor.

3.5 CABOS E CONECTORES ELÉTRICOS

Para seleccionar os cabos e conectores elétricos do atuador, a resistência da armadura do motor foi medida com o uso de um multímetro na escala ôhmica, em seis posições diferentes do rotor, obtendo-se um valor médio de $0,42 \Omega$.

O melhor conector selado disponível nos materiais da equipe foi um conector Molex do tipo ML-XT⁷, com resistência de contato máxima de $30 \text{ m}\Omega$ e corrente nominal máxima de $13,0 \text{ A}$. Como o tempo em que a carga permanece acionada é muito pequeno, da ordem de 150 ms , para intervalos entre acionamentos de marcha de alguns segundos, é esperado que a corrente média demandada pela carga seja muito inferior a corrente máxima do conector, portanto, dispensando a aquisição de um novo conector.

Com a indisponibilidade de cabos elétricos automotivos, optou-se pelo uso de cabos elétricos de instalações prediais. Para um par de 30 cm de cabos – comprimento dos cabos do atuador – consultando-se a Tabela 3, calculou-se a resistência equivalente para cada bitola de cabo e os resultados foram apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência elétrica para quatro metros de cabos flexíveis.

Seção nominal (mm ²)	Resistência máxima do condutor a 20° C
	Fios nus (m Ω / 0,6 m)
0,5	23,40
0,75	15,60
1	11,70
1,5	7,98
2,5	4,79
4	2,97

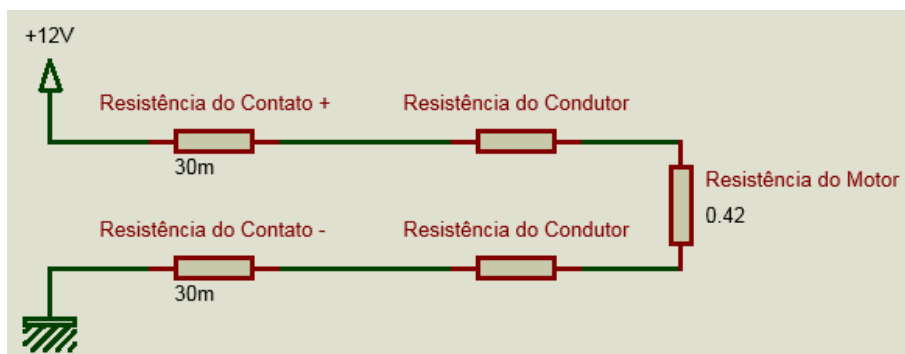
Fonte: Próprio autor.

A partir de um circuito equivalente, representado na Figura 33, contendo as resistências do motor, dos cabos e dos contatos do conector, foi possível calcular a queda de

⁷ Mais detalhes desse produto podem ser encontrados no site do fabricante: <https://www.molex.com/molex/products/family?key=mlxt_sealed_connection_system&channel=products&channelName=family&pageTitle=Introduction&parentKey=sealed_connectors> Acessado em: 23 fev. 2018.

tensão em cada resistência e a corrente de rotor bloqueado do atuador para cada bitola de condutor.

Figura 33 - Circuito equivalente do motor com rotor bloqueado;



Fonte: Próprio autor.

Como, pela primeira lei de Ohm, a corrente do circuito série é igual a tensão da bateria dividida pela soma de todas as resistências em série e a queda de tensão em cada resistência de um circuito série é igual ao valor da resistência multiplicada pela corrente do circuito, pode-se calcular a queda de tensão nos condutores como na Equação (13).

$$\Delta V_{cond} = R_{cond} \cdot \frac{V_{bat}}{2R_{cont} + R_{cond} + R_{mot}} \quad (13)$$

Calculando para cada condutor, tem-se os resultados da Tabela 5.

Tabela 5 - Quedas de tensão nos condutores.

Seção nominal (mm ²)	Quedas de tensão nos condutores (V)	Queda de tensão nos condutores (%)
0,5	0,56	4,7
0,75	0,38	3,2
1	0,29	2,4
1,5	0,20	1,7
2,5	0,12	1,0
4	0,07	0,6

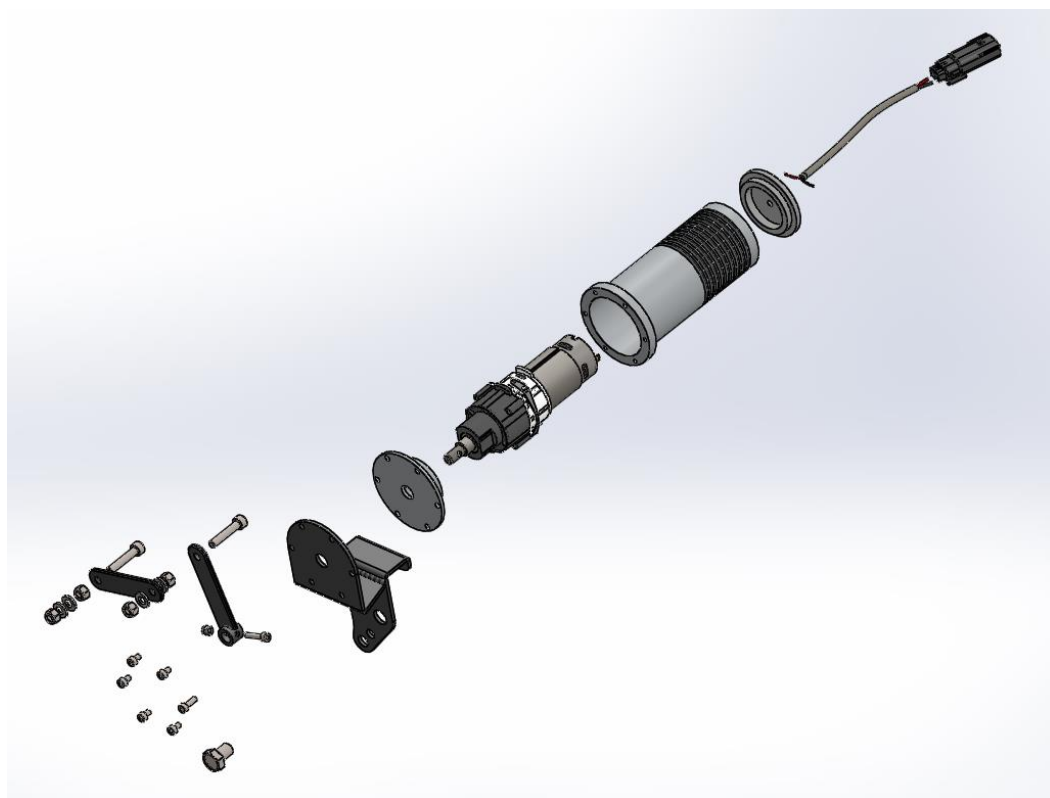
Fonte: Próprio autor.

Para uma queda de tensão nos condutores inferior a 2% da tensão da bateria, foi selecionado o cabo de 1,5 mm² se seção. A corrente máxima obtida nesse circuito é calculada pela primeira lei de Ohm na Equação (14).

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12}{0,030+0,030+0,42+0,00798} = 24,6 \text{ A} \quad (14)$$

A crimpagem⁸ dos terminais e montagem do conector foram feitos seguindo os padrões de qualidade da norma IPC/WHMA-A-620B⁹ e as recomendações do fabricante do conector informadas no manual do conector. Os cabos foram soldados diretamente aos terminais do motor e protegidos por um espaguete termo retrátil. A vista explodida do atuador é apresentada na Figura 34.

Figura 34 - Vista explodida do atuador com flange de fixação e mecanismo de quatro barras.



Fonte: Próprio autor.

⁸ Processo utilizado para fixar terminais elétricos em fios e cabos elétricos, mediante conformação mecânica dos mesmos.

⁹ Norma que versa sobre os padrões de qualidade para montagem de cabos e chicotes elétricos. Disponibilizada no site da *Association Connecting Electronics Industries* – IPC em: <http://www.ipc.org/committee/drafts/7-31F_d_620B-Feb2012.pdf> Acessado em 23 fev. 2018.

3.6 FABRICAÇÃO

A carcaça do atuador foi usinada e o mecanismo de quatro barras foi cortado e acabado pelo autor do trabalho na própria oficina mecânica da universidade, por torneamento e fresamento e com o uso de ferramentas manuais. O atuador montado é apresentado na Figura 35 e sua instalação com o mecanismo de quatro barras é ilustrada na Figura 36.

Figura 35 - Atuador montado.



Fonte: Próprio autor

Figura 36 - Mecanismo fabricado e instalado no motor.



Fonte: Próprio autor

Com o atuador e o mecanismo de quatro barras prontos, foram realizados testes com inversão de sentido e mudança de velocidade. Foi observado que o atuador conseguiu acionar a alavanca de câmbio nas duas velocidades disponíveis com torque de 30 Nm para a menor velocidade e 15 Nm para a maior velocidade. Com essa constatação, a alavanca seletora de velocidade do atuador foi fixada para a maior velocidade para prover um acionamento mais rápido.

4 RESULTADOS

O sistema apresentou a performance esperada nos testes práticos, demonstrando torque superior ao necessário para acionar a alavanca de câmbio em todo o seu curso. Foram feitas furações de ajustes na alavanca do atuador para posterior reposicionamento do parafuso da articulação, para futuros testes de desempenho e seleção de novas configurações no que tange a velocidade de acionamento.

Na configuração apresentada no presente trabalho, o sistema alcançou um tempo de acionamento muito satisfatório, de aproximadamente 125 milissegundos, que representa uma velocidade de acionamento superior a maioria dos casos de outras equipes apresentados na fundamentação do presente trabalho. Esse tempo foi obtido durante o ajuste do software de controle do atuador, iniciando-se com um tempo de acionamento alto e reduzindo-se até que o atuador acionasse a marcha sem impactar no seu fim de curso.

Como foi presumido no desenvolvimento do sistema, o atuador apresentou a robustez esperada de um sistema sobredimensionado. Ao realizar os testes com o sistema de controle já com o tempo de acionamento devidamente configurado, não foi observado qualquer comportamento que viesse a acusar um desgaste rápido do mecanismo, como deformações excessivas, impactos ou desgastes dos componentes.

O custo para produzir o atuador, apesar de não ter sido contabilizado por falta de informações sobre os itens já disponíveis na oficina utilizados no projeto – como tarugos de alumínio, materiais de refugo ou sucata de parafusadeira e conector elétrico – foi desprezível em todos os aspectos se comparado com a alternativa de aquisição de um sistemas comercializados para a aplicação pela equipe.

Quanto ao aquecimento do mecanismo, não foi observada uma elevação de temperatura sensível ao toque no corpo do mecanismo, o que pode sugerir que o regime de trabalho em que o atuador foi submetido não ocasiona uma sobre-elevação de temperatura que venha a prejudicar o seu motor. Um estudo posterior deverá ser feito para investigar esse aspecto de funcionamento.

5 CONCLUSÃO

A escolha de um conjunto de motor e redução planetária de uma parafusadeira Bosch profissional disponível como refugo nos materiais da equipe se mostrou muito satisfatória, pois o projeto do atuador se favoreceu da confiabilidade desse mecanismo – um mecanismo comercializado e que leva a marca de uma renomada fabricante de ferramentas elétricas.

Além da confiabilidade, a escolha do mecanismo de motor e redução planetária de uma parafusadeira proporcionou a simplificação no desenvolvimento do atuador e a redução de custos, uma vez que esse mecanismo já possuía um motor elétrico e uma redução planetária com relações de torques e velocidades compatíveis com os requisitos do sistema e já se encontrava disponível como material de sucata da equipe.

A escolha do alumínio como material para a fabricação do corpo do atuador também se mostrou muito satisfatória em termos de performance, facilidade de fabricação e custo, por ser um material leve e possuir característica de resistência mecânica compatível com os requisitos do projeto, por ser de fácil usinabilidade e por estar disponível nos materiais da equipe na forma de tarugo em dimensões apropriadas para esse projeto.

O mecanismo de quatro barras se mostrou uma boa opção para transmissão de torque entre o atuador e o eixo da alavanca de câmbio, por ter sido facilmente fabricado com ferramentas manuais e com o uso de barras chatas disponíveis nos materiais da equipe, por ter um funcionamento muito simples, confiável e por ser facilmente instalado e ajustado no sistema. Durante os testes, esse mecanismo apresentou um comportamento muito satisfatório, transmitindo o torque com folgas e deformações desprezíveis.

Quanto ao suporte do atuador, apesar de ter garantido a fixação do atuador no corpo do motor do veículo com firmeza, a sua instalação se mostrou muito trabalhosa, devido a partes salientes do corpo do motor que conflitavam com partes do suporte durante a instalação. Além disso, o seu projeto também foi feito presumindo como sobredimensionado, numa geometria obtida experimentalmente para uma posterior melhora, onde ele poderá ser remodelado e estudado para atingir coeficiente de segurança e peso compatíveis com componentes de competição automotiva.

6 SUGESTÕES

Com relação ao corpo do atuador feito em alumínio, pode-se fazer um estudo de resistência mecânica para se remodelar a sua geometria, com o intuito de reduzir a sua massa e obter um coeficiente de segurança compatível com componentes de veículos de competição automotiva.

Outra modificação importante para ser realizada no corpo do atuador é a adição de elementos de vedação, como orings e passa-fios, nas tampas e furações da carcaça e realizar um estudo para verificar o grau de proteção do motor quanto a incrustação de líquidos e elementos sólidos particulados, uma vez que esse sistema é empregado numa região do carro sujeito a essas intempéries.

Para o conjunto de motor e redução planetária, pode-se fazer ensaios para se obter os parâmetros de funcionamento do motor elétrico, eficiência de transmissão da redução planetária e se fazer um estudo da potência térmica dissipada pelo equipamento no regime de trabalho a que ele é submetido. Com esses estudos, será possível saber a elevação de temperatura do motor para o regime de trabalho proposto e, com isso, caso necessário, remodelar as aletas do corpo do atuador para favorecer uma melhor dissipação do calor gerado no interior do atuador

. Um estudo de resistência mecânica também deve ser feito no mecanismo de quatro barras para que o mesmo possa ser remodelado com o intuito de reduzir a sua massa e se obter um coeficiente de segurança compatível com a aplicação a que se destina. Além disso, o comprimento das alavancas deve ser diminuído para se obter torques de inércia menores e, com isso, aumentar a velocidade de acionamento do mecanismo.

O suporte do atuador é, talvez, o componente que mais necessita de modificações, por ser de difícil instalação e por ter um peso elevado. Assim como os outros componentes mecânicos, ele foi feito presumindo como sobredimensionado, numa geometria obtida experimentalmente para uma posterior melhora. Portanto, também deverá ser feito um estudo de resistência mecânica pelos mesmos motivos expostos para os casos anteriores.

REFERÊNCIAS

AJIROGI, A. et al. **Paddle Shifters**. University of California. Berkeley, p. 32. 2011.

AUTÓDROMO INTERNACIONAL DA PARAÍBA. Disponível em: <<https://www.facebook.com/AUTODROMODAPARAIBA/>>. Acesso em: 27 Fevereiro 2018.

BOSCH POWER TOOLS. Sobre a parafusadeira Bosch GSR 14-4. Disponível em: <<http://www.bosch-professional.com/br/pt/cordless-drilldriver-gsr-14-4-2-226567-0601918gd0.html>>. Acesso em: 2018 Fevereiro 2018.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução a Análise de Circuitos**. 12^a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos**. 11^a. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10^a. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

CHALMELA, R. J. **Electro-pneumatic Shifting and Servo Control of a Clutch of a FSAE Race Car**. The University of Texas at Arlington. Arlington, p. 68. 2017.

ESPORTE CLUBE PIRACICABANO DE AUTOMOBILISMO. Disponível em: <<http://www.ecpa.com.br/capa.asp?n=464>>. Acesso em: 27 Fevereiro 2018.

FLATSHIFTER. Sobre a empresa: Flatshifter. **Site da Flatshifter**, 2018. Disponível em: <<https://www.flatshifter.com/>>. Acesso em: 03 Junho 2018.

FORMULA SAE BRASIL. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil>>. Acesso em: 27 Fevereiro 2018.

IPC, A. C. E. I.-. **IPC/WHMA-A-620B: Requirements and Acceptance for Cable and Wire Harness Assemblies**. Association Connecting Electronics Industries - IPC. [S.l.]. 2012.

KENNETT, A. J. **Design of a Pneumatically Assisted Shifting System for Formula SAE Racing Applications**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, p. 42. 2008.

KOSOW, I. I. **Máquinas elétricas e transformadores**, 4ª ed. Globo S.A. Porto Alegre. 1982.

LEAR, G.; MOSHER, L. S. **Motorcycle Mechanics**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1977.

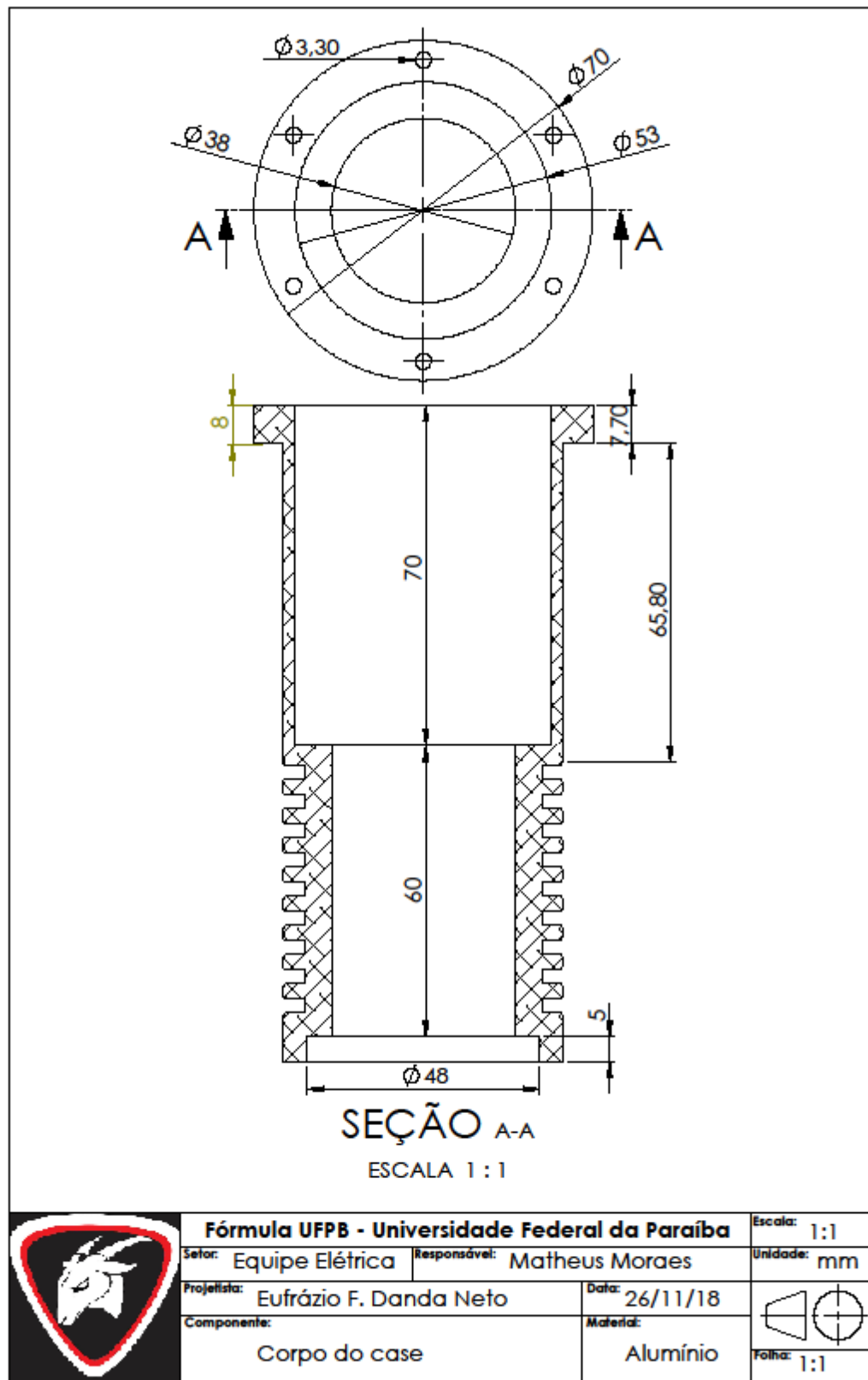
MARKUS, O. **Circuitos Elétricos - Corrente Contínua e Corrente Alternada**. 8ª. ed. [S.l.]: Érica Ltda., 2004.

MOLEX. Sobre o conector Molex ML-XT. Disponível em: <https://www.molex.com/molex/products/family?key=mlxt_sealed_connection_system&channel=products&chanName=family&pageTitle=Introduction&utm_source=dpb&utm_medium=lit&utm_campaign=general>. Acesso em: 27 Fevereiro 2018.

NAUNHEIMER, H. **Automotive Transmissions Fundamentals, Selection, Design and Application**. 2ª. ed. Friedrichshafen: Springer, 2011.

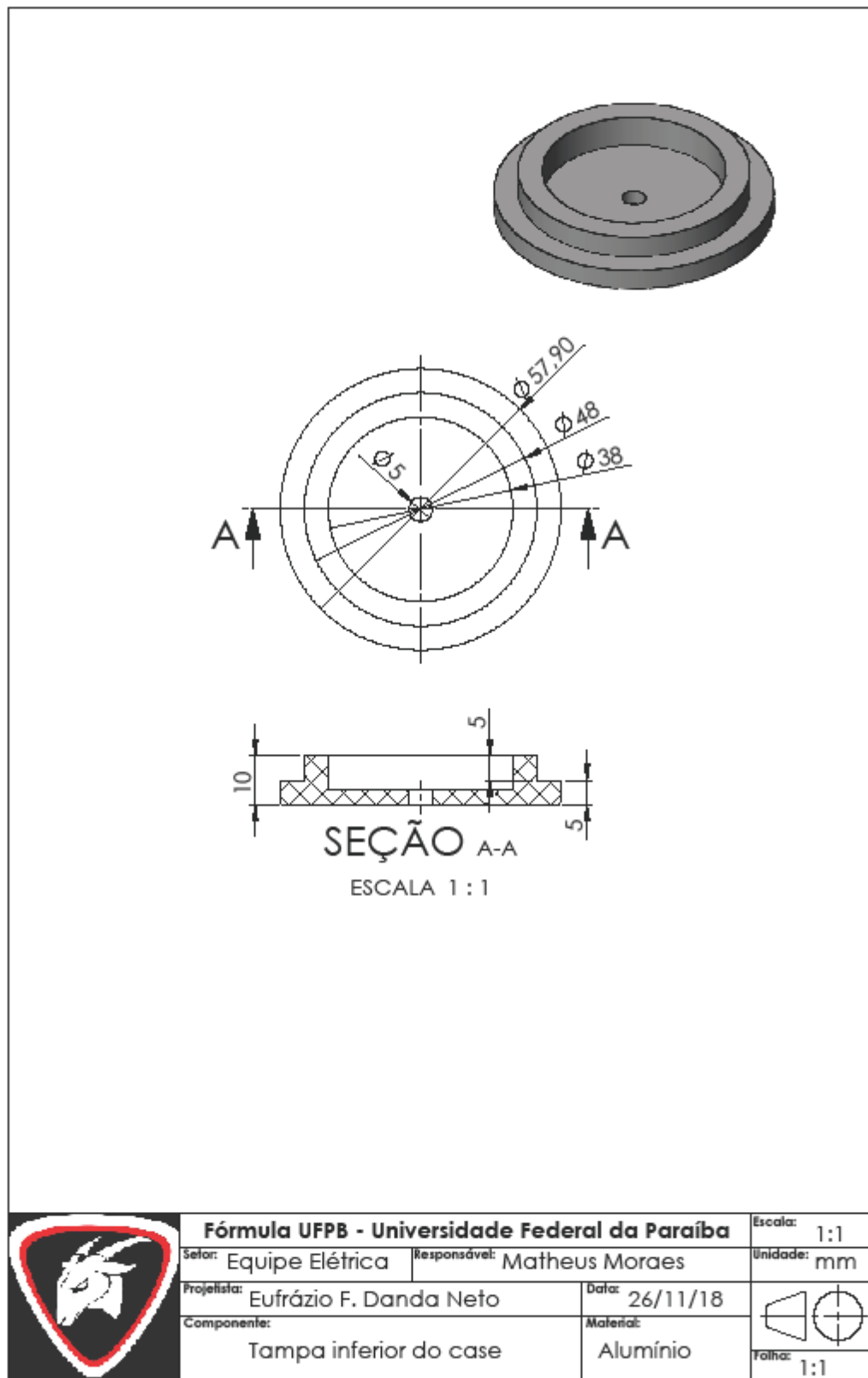
NORTON, R. L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. Porto Alegre: AMGH, 2010.

APÊNDICE A – CORPO DO CASE



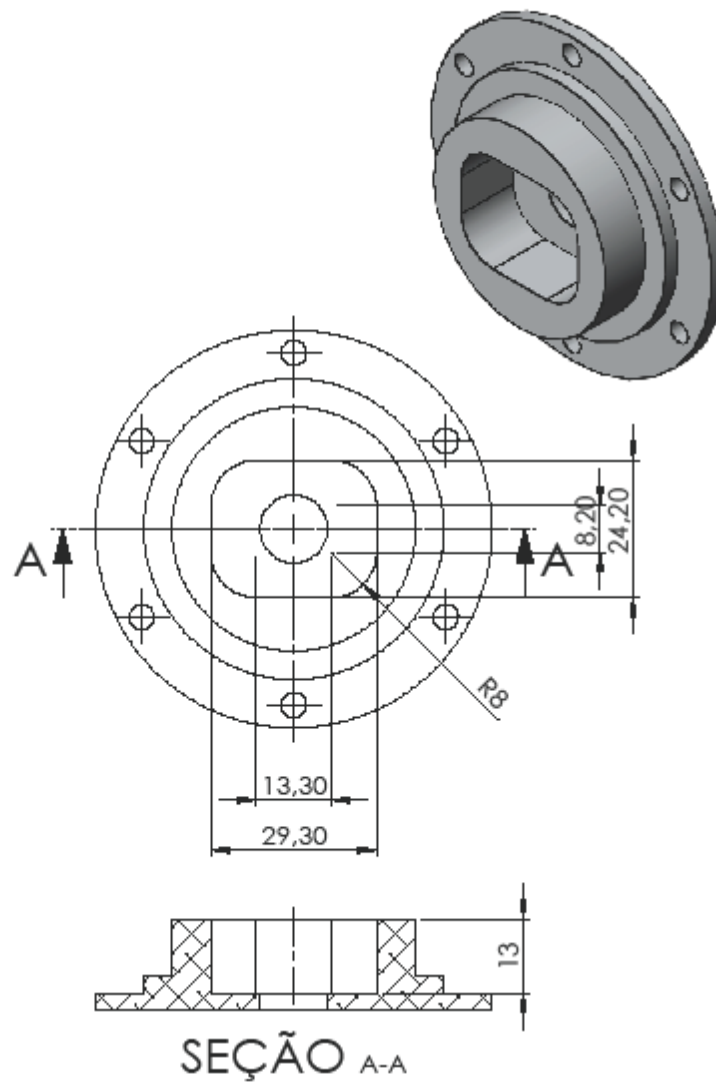
Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.

APÊNDICE B – TAMPA INFERIOR DO CASE



Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.

APÊNDICE C – TAMPA SUPERIOR DO CASE



Fórmula UFPB - Universidade Federal da Paraíba

Sector: Equipe Elétrica

Responsável: Matheus Moraes

Projetista: Eufrazio F. Danda Neto

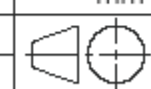
Data: 26/11/18

Componente: Tampa superior do case

Material: Alumínio

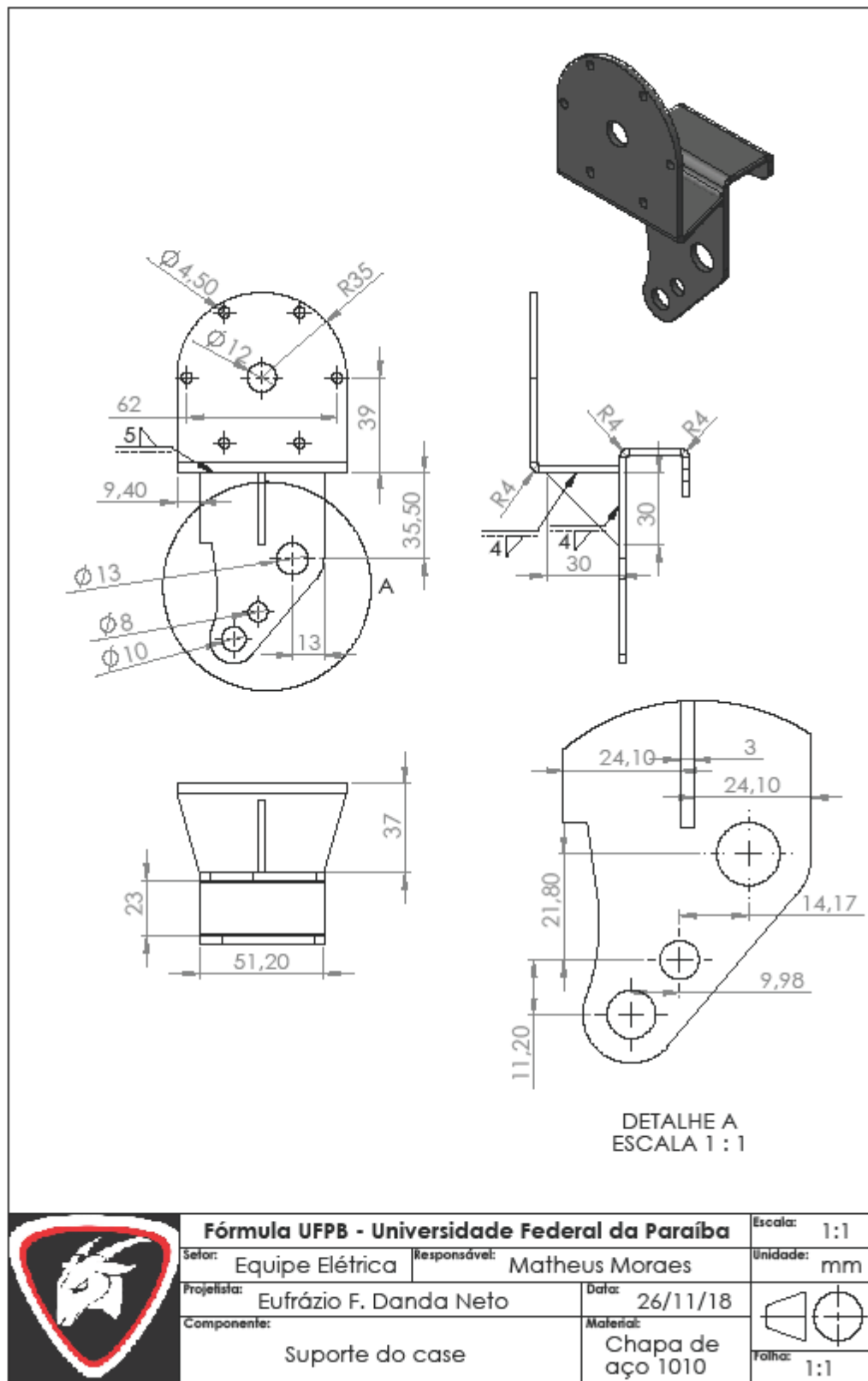
Escala: 1:1

Unidade: mm

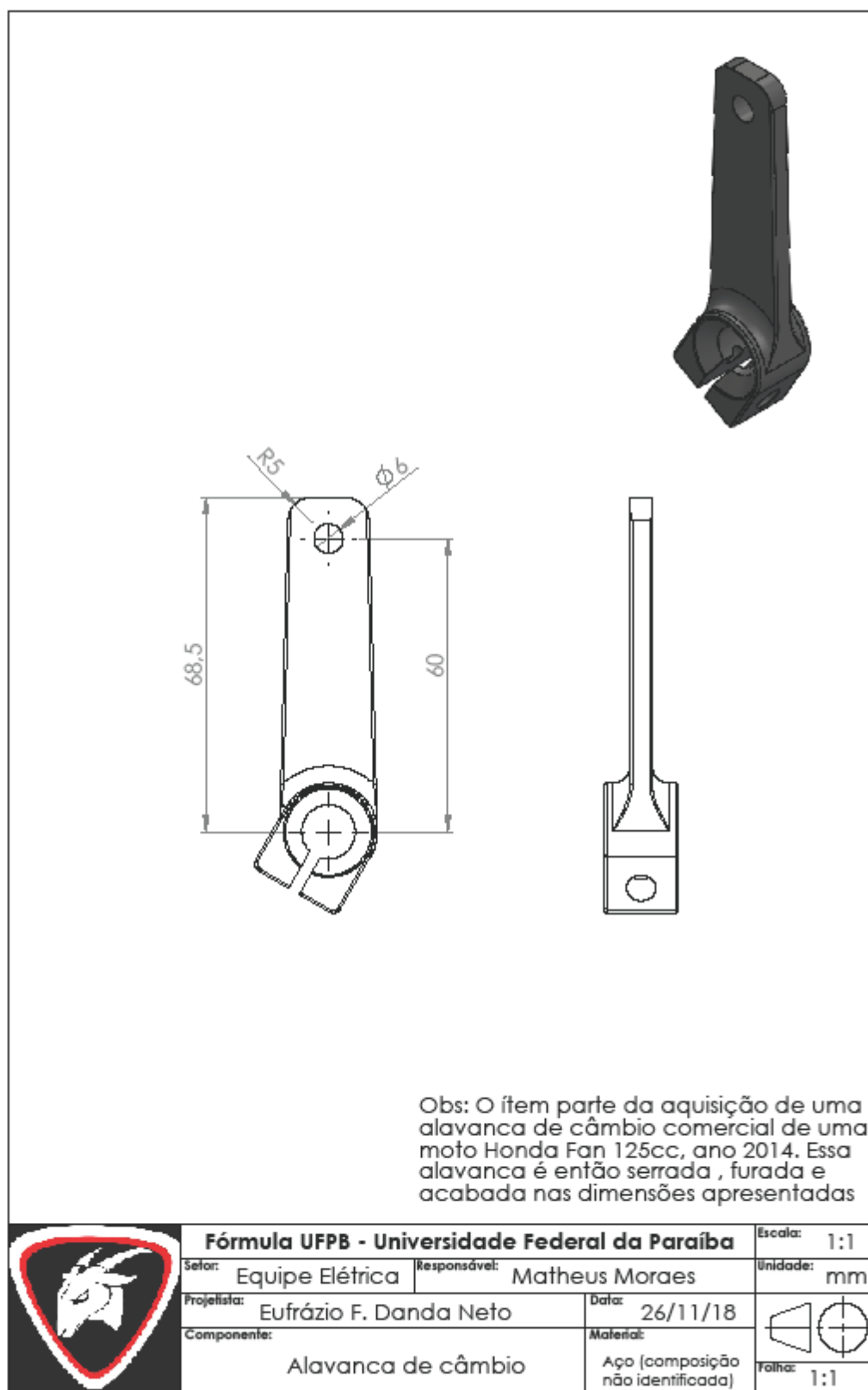


Folha: 1:1

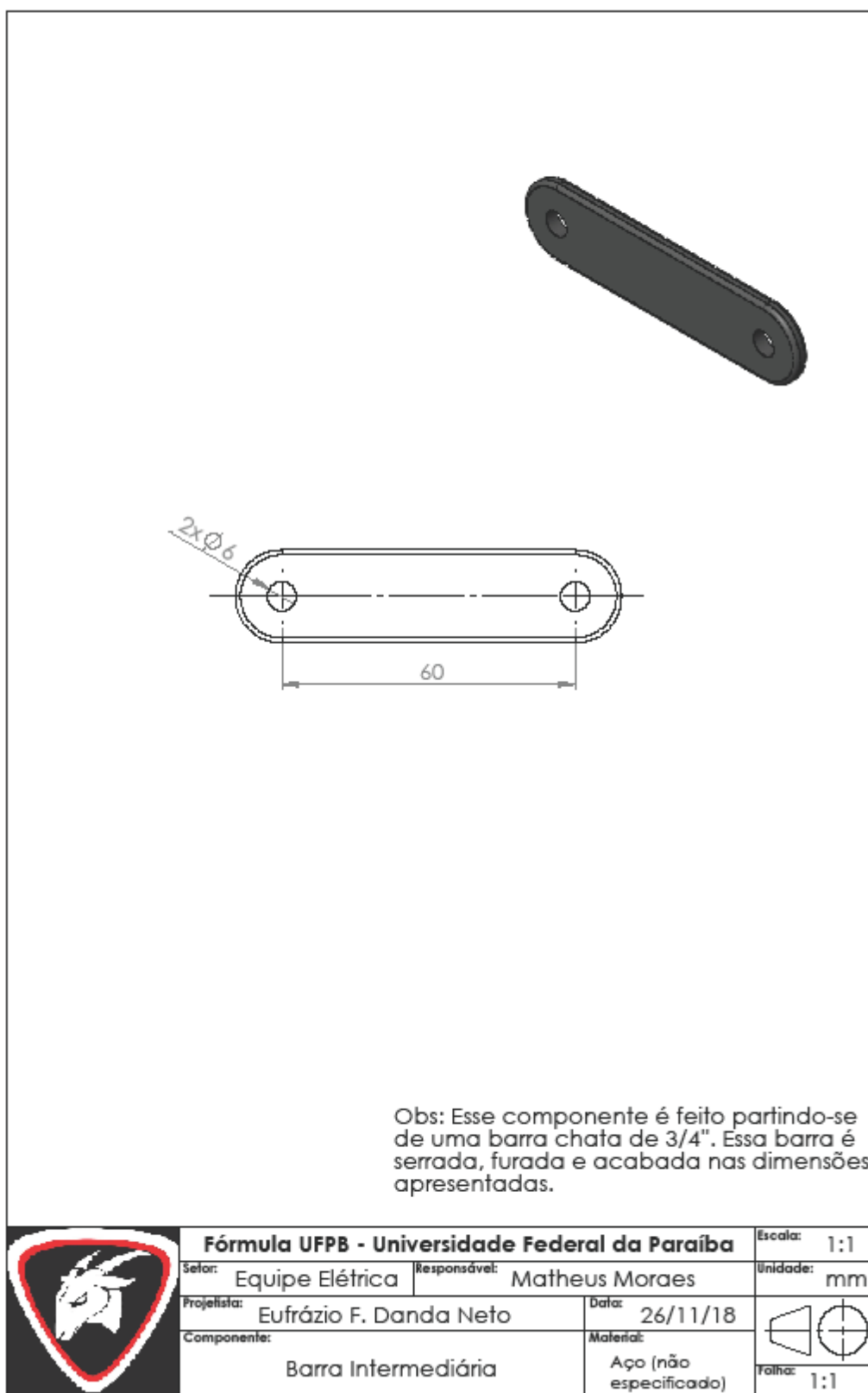
APÊNDICE D – SUPORTE DO CASE



APÊNDICE E – ALAVANCA DE CÂMBIO



APÊNDICE F – BARRA INTERMEDIÁRIA



APÊNDICE G – ALAVANCA MOTORA

