

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MATHEUS FABRÍCIO DA SILVEIRA**

**ARTRÓPODE MECÂNICO:**

**Projeto de Mecanismo para Movimentação de Artrópode Mecânico**

**São Leopoldo**

**2021**

MATHEUS FABRÍCIO DA SILVEIRA

**ARTRÓPODE MECÂNICO**

**Projeto de Mecanismo para Movimentação de Artrópode Mecânico**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel, pelo Curso  
de Engenharia Mecânica da Universidade  
do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Walter Andrey Fontana

São Leopoldo

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer ao meu orientador Walter Andrey Fontana por me ajudar a escolher o tema deste trabalho e por toda sua ajuda, apoio e orientação.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo projetar um robô com estrutura mecânica similar aos corpos dos animais das classes de artrópode e que se seja adaptável para se locomover em terrenos *off-road*. Para isso foram definidos objetivos específicos a serem alcançados durante o desenvolvimento do trabalho. Para executar o trabalho foram apresentados por meio da fundamentação teórica os sistemas de movimentação de veículos *off road*, sistemas de locomoção de animais terrestres, sistemas mecânicos de deslocamento terrestre baseado em animais e o estado da arte. Mediante a apresentação da fundamentação teórica, foi estudada uma metodologia para a execução do projeto, baseada na concepção de movimento de engrenagens, correntes, eixos e mancais de rolamento e na concepção do mecanismo de came e seguidor invertido na movimentação das pernas do robô. O projeto foi projetado através do *software Solidworks*, onde nele foi modelado todos os componentes e executado a montagem no modo virtual procurando atender os requisitos do trabalho. Durante a execução, foi mostrado as etapas de montagem do mecanismo do robô. Após a apresentação final do projeto, foi calculado o torque máximo necessário para movimentação, cálculos de desempenho, de consumo de bateria e de velocidade. E na última etapa de execução, foi realizado simulações numéricas através dos *softwares Solidworks e Ansys Mechanical* para obter as possíveis tensões máximas. Com a execução finalizada, foi analisado os resultados obtidos com o projeto finalizado, e discutido as soluções e aprimoramentos do mecanismo. E por fim, foi feita considerações a respeito do tema e do projeto final.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ângulos de Aplicação <i>Off-Road</i> .....	18
Figura 2 – Primeiro Jipe construído modelo <i>Bantam</i> .....	19
Figura 3 – Jipe modelo CJ-5 .....	20
Figura 4 – Modelo Jipe Wrangler YJ .....	21
Figura 5 – Sistema mecânico do modelo Wrangler .....	21
Figura 6 – Motocicleta com sistema de suspensão monochoque (destacado pelo círculo vermelho).....	22
Figura 7 – Motocicleta off road modelo XI 250 .....	22
Figura 8 – Plataforma veicular esquematizada de lagarta mecânica .....	24
Figura 9 – Tanque brasileiro Bernardini MB-3 Tamoyo.....	24
Figura 10 – Escavadeira modelo Silver Spade construída pela empresa Bucyrus ...	25
Figura 11 – Trator modelo Caterpillar D11 .....	25
Figura 12 – Esquematização da locomoção de animal terrestre.....	26
Figura 13 – Movimentação de rastejo da minhoca.....	27
Figura 14 – Movimento ondulatório da Serpente.....	28
Figura 15 – Movimento concertina .....	28
Figura 16 – Movimento Retilíneo da Serpente .....	28
Figura 17 – Alavancas mecânicas de locomoção .....	30
Figura 18 Posição dos Músculos nos Ossos.....	31
Figura 19 – Representação do Modo Tripé de Caminhar dos Insetos .....	32
Figura 20 – Salto do Antílope .....	33
Figura 21 – Robô Móvel de Guerra Modelo LS3.....	34
Figura 22 – Salamandra Robótica.....	36
Figura 23 – Configuração do controle da Salamandra Robótica .....	37
Figura 24 – Fluxograma da Metodologia.....	38
Figura 25 - Concepção do mecanismo.....	39
Figura 26 – Concepção Came e Seguidor Invertidos.....	40
Figura 27 – Etapas do Modelamento .....	42
Figura 28 – Vista explodia dos componentes.....	43
Figura 29 – Dimensional da chapa came .....	45
Figura 30 – Representação Motor Alto Torque (MB02012).....	46
Figura 31 – Desenho do Eixo Condutor .....	47

Figura 32 – Roda Dentada Dupla.....	47
Figura 33 – Roda Dentada Moviada.....	48
Figura 34 – Conjunto Mancal e Rolamentos .....	49
Figura 35 – Vistas Explodida e Montada do Conjunto Seguidor .....	50
Figura 36 – Pino Seguidor.....	51
Figura 37 – Pata Dianteira Esquerda .....	52
Figura 38 – Perna Central .....	53
Figura 39 – Detalhamento da Pata do Artrópode Mecânico.....	54
Figura 40 – Representação do Elo Binário.....	55
Figura 41 – Conjunto de Correntes .....	55
Figura 42 – Suporte Mancal e Motor. ....	57
Figura 43 – Flange de Sustentação do Motor .....	57
Figura 44 -Componentes Suporte do Motor .....	58
Figura 45 – Suporte Central .....	59
Figura 46 – Suporte Espaçador.....	59
Figura 47 – Suporte do Eixo dos Elos Binários .....	60
Figura 48 – Chapa de assentamento da Mola.....	60
Figura 49 – Suporte Câmera Go-pro.....	61
Figura 50 – Componentes Eletroeletrônicos. ....	62
Figura 51 – Chapa de Fechamento Frontal e Traseira.....	63
Figura 52 – Chapa de Fechamento Superior .....	64
Figura 53 – Etapa de Montagem 1 .....	65
Figura 54 - Etapa de Montagem 2.....	65
Figura 55 – Etapa de Montagem 3 .....	66
Figura 56 – Etapa de Montagem 4 .....	67
Figura 57 – Etapa de Montagem 5.....	67
Figura 58 – Etapa de Montagem 6 .....	68
Figura 59 – Visualização dos Conjuntos Seguidores Montados.....	68
Figura 60 – Etapa de Montagem 7 .....	69
Figura 61 – Acoplamento da Perna .....	70
Figura 62 – Montagem Pata.....	70
Figura 63 – Etapa de Montagem 8 .....	71
Figura 64 – Graus de Liberdade dos Elos Binários e Juntas .....	72
Figura 65 – Etapa de Montagem 9.....	72

Figura 66 – Etapa de Montagem 10 .....	73
Figura 67 - Etapa de Montagem 11 .....	74
Figura 68 – Etapa de Montagem 12 .....	74
Figura 69 – Etapa de Montagem 13 .....	75
Figura 70 – Vista Frontal .....	76
Figura 71 – Vista Lateral esquerda .....	76
Figura 72 – Vista Superior.....	77
Figura 73 – Vista Isométrica.....	77
Figura 74 – Diagrama das Forças Verticais Sobre as Patas do Robô. ....	79
Figura 75 – Ponto de Distância Maior da Pata Dianteira.....	81
Figura 76 – Ângulos e Forças Vetoriais .....	82
Figura 77 – Bateria 1 Modelo UP1223 .....	86
Figura 78 – Bateria 2 Modelo UP1290 .....	87
Figura 79 – Raio no Início da Trajetória do Seguidor com a Pata ao Solo na Aresta Linear da Came.....	89
Figura 80 – Raio na Metade do Percurso do Seguidor na Aresta Linear da Came...	90
Figura 81 – Raio no Fim do Percurso do Seguidor na Aresta Linear da Came.....	90
Figura 82 - Raio no Início da Trajetória do Seguidor na Aresta Linear da Came Central.....	91
Figura 83 - Raio na Metade da Trajetória do Seguidor na Aresta Linear da Came Central.....	92
Figura 84 - Raio no Fim da Trajetória do Seguidor na Aresta Linear da Came Central .....	92
Figura 85 – Vista Lateral Esquerda com as Cames Numeradas.....	93
Figura 86 – Simulação de Apoio da Pata .....	95
Figura 87 – Análise de Carregamento para o Cálculo da Perna .....	96
Figura 88 – Face de Aplicação da Carga .....	96
Figura 89 – Análise Elementos Finitos para Tensão Máxima.....	97
Figura 90 – Análise do Carregamento na Perna Mediana .....	98
Figura 91 – Análise de Elementos Finitos para Tensão Máxima Equivalente para a Perna Mediana .....	99
Figura 92 – Análise das Forças aplicadas sobre Eixo .....	99
Figura 93 – Metodologia de Análise de Torção do Eixo .....	100
Figura 94 – Resultados da Simulação para Torque de 10,1 Nm.....	101

Figura 95 - Resultados da Simulação para Torque de 20 Nm .....	101
Figura 96 – Sistema de Amortecimento das Pernas Frontais .....	103
Figura 97 – Posicionamento das Pernas.....	104
Figura 98 – Numerações das pernas em relação aos Seguidores.....	104
Figura 99 – Ângulos de Obstáculos e Medição da Altura de Elevação da Pata.....	107

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distância x Posição Seguidor Lado Esquerdo .....	105
Gráfico 2 – Distância x Posição Seguidor Lado Direito .....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes do Artrópode Mecânico .....	43
Tabela 2 – Dados Dimensionais da Came .....	45
Tabela 3 – Dados do motor .....	46
Tabela 4 – Dados da Engrenagem Dupla. ....	48
Tabela 5 – Dados do Conjunto Mancal Rolamento. ....	49
Tabela 6 – Dados de Projeto da Corrente de Rolo.....	56
Tabela 7 – Lista dos Componentes Eletroeletrônicos .....	62
Tabela 8 – Dados do Artrópode Mecânico .....	78
Tabela 9 – Coeficientes de Atrito .....	83
Tabela 10 – Especificações Técnicas da Bateria UP1223 .....	86
Tabela 11 – Especificações Técnicas da Bateria UP1290 .....	87
Tabela 12 – Cálculo das Velocidades da Came 1 .....	93
Tabela 13 - Cálculo das Velocidades da Came 2.....	94
Tabela 14 - Cálculo das Velocidades da Came 3.....	94
Tabela 15 – Comparações dos Resultados.....	107
Tabela 16 – Dados do Material AISI / SAE 4340.....	110

## LISTA DE SIGLAS

ABS	Antilock Braking System
AISI	American Iron and Steel Institute
CJ	Civilian Jeep
Cpg	Central Pattern Generator
DC	Direct Current
GDL	Grau de Liberdade
kg	Quilograma
kW	Quilowatt
Lfa	Length of the force arm
LS3	Legged Squad Support System
Lwa	Length of the weight arm
M4	Rosca Métrica Diâmetro 4mm
mm	Milímetro
rpm	Rotações por minuto
SAE	Society of Automotive Engineers
YJ	Yuppie Jeep
M5	Rosca Métrica Diâmetro 5mm
M6	Rosca Métrica Diâmetro 6mm

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1 Tema</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2 Delimitação do Tema</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3 Problema</b> .....	<b>15</b>
<b>1.4 Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.4.1 Objetivo Geral .....	15
1.4.2 Objetivos Específicos .....	15
<b>1.5 Justificativa</b> .....	<b>16</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Sistemas de Movimentação de Veículos <i>Off-road</i></b> .....	<b>17</b>
2.1.1 Movimentação de Quatro Rodas .....	18
2.1.2 Movimentação duas rodas .....	21
2.1.3 Movimentação Esteira lagarta .....	23
<b>2.2 Sistemas de Locomoção de Animais Terrestres</b> .....	<b>26</b>
2.2.1 Rastejo .....	27
2.2.2 Caminhada .....	29
2.2.3 Salto .....	32
<b>2.3 Sistema Mecânico de Deslocamento Terrestre Baseado em Animal</b> .....	<b>33</b>
2.3.1 O Robô Quadrupede de Guerra .....	34
<b>2.4 Estado da Arte</b> .....	<b>35</b>
2.4.1 Salamandra Robótica .....	35
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1 Objetivo</b> .....	<b>38</b>
<b>3.2 Requisitos</b> .....	<b>38</b>
<b>3.3 Concepção</b> .....	<b>39</b>
3.3.1 Concepção geral do mecanismo .....	39
3.3.1 Concepção movimento das pernas .....	40
<b>4. EXECUÇÃO DO PROJETO</b> .....	<b>42</b>
<b>4.1 Componentes do projeto</b> .....	<b>42</b>
4.1.1 Chapas Came .....	44
4.1.2 Motor .....	45
4.1.3 Eixos .....	46

4.1.3 Roda Dentada Dupla .....	47
4.1.4 Roda Dentada Movidada .....	48
4.1.5 Mancais e Rolamentos .....	49
4.1.6 Conjunto Seguidor .....	50
4.1.7 Pino Seguidor .....	50
4.1.8 Pernas .....	51
4.1.9 Patas .....	53
4.1.10 Barras de Articulação .....	54
4.1.11 Correntes .....	55
4.1.12 Suportes .....	56
4.1.13 Componentes Complementares .....	61
4.1.14 Chapas de Fechamento .....	63
<b>4.2 Etapas de Montagem .....</b>	<b>64</b>
4.2.1 Etapa 1: Montagem dos Suportes Centrais e Chapas Cames .....	64
4.2.2 Etapa 2: Montagem das Chapas Laterais .....	65
4.2.3 Etapa 3: Montagem dos Motores e Engrenagem Motora .....	66
4.2.4 Etapa 4: Montagem dos Mancais .....	66
4.2.5 Etapa 5: Montagem dois Eixos e Engrenagens .....	67
4.2.6 Etapa 6: Montagem dos Seguidores .....	68
4.2.7 Etapa 7: Montagem das Pernas e Patas .....	69
4.2.8 Etapa 8: Montagem do Suporte dos Elos .....	70
4.2.9 Etapa 9: Montagem do Elos Binários .....	71
4.2.10 Etapa 10: Montagem das Correntes .....	73
4.2.11 Etapa 11: Montagem dos Suportes Adicionais .....	73
4.2.12 Etapa 12: Montagem dos Componentes Eletroeletrônicos .....	74
4.2.13 Etapa 13: Montagem das Chapas de Fechamento .....	75
<b>4.3 Projeto Final .....</b>	<b>75</b>
<b>4.4 Cálculos de Desempenho .....</b>	<b>78</b>
4.4.1 Cálculo do Torque .....	80
4.4.2 Cálculo da Potência Requerida do Motor .....	85
4.4.3 Cálculo do Consumo da Bateria .....	86
4.4.4 Cálculo da Velocidade .....	88
<b>4.5 Simulação de Elementos Finitos .....</b>	<b>94</b>
4.5.1 Resistência à Flexão das Pernas Maiores. ....	94

4.5.2 Resistência à Flexão da Perna Central .....	98
4.5.3 Resistência à Torção e Flexão do Eixo .....	99
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>102</b>
<b>5.1 Análise dos Resultado do Projeto Final Consolidado .....</b>	<b>102</b>
5.1.1 Aderência .....	102
5.1.2. Isolamento.....	102
5.1.3 Estabilidade.....	103
5.1.4 Capacidade de Ultrapassar obstáculos.....	106
<b>5.2 Análise dos Resultados do Desempenho .....</b>	<b>107</b>
<b>5.3 Análise dos resultados das Resistências .....</b>	<b>108</b>
5.3.1 Pernas.....	108
5.3.2 Eixo .....	109
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>111</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo da mobilidade tem sido importante para o desenvolvimento de novos mecanismos de movimentação para a área de engenharia mecânica, possibilitando assim a fabricação de novos meios de locomoção e transporte. Desde os tempos primórdios da história, o homem sentiu a necessidade de descobrir meios para se locomover com mais agilidade e facilidade. O primeiro meio de locomoção a ser considerado é o próprio caminhar natural do homem, mas a medida em que a humanidade foi se desenvolvendo, percebeu-se que animais poderiam ser domesticados para a função de transporte, sendo assim, os primeiros meios de transportes individuais a serem introduzidos na história foram os animais de médio e grandes portes, sendo os cavalos como os mais conhecidos.

Com passar dos anos, os estudos de mecanismo e mobilidade foram se aprofundando e conseqüentemente novos sistemas de movimentação foram criados, dando origem aos meios de transportes que conhecemos hoje como os automóveis, motocicletas, barcos, aviões etc.

Com a integração da automação, com a robótica e a engenharia, diversos dispositivos de controle e sistemas de movimentação automatizados tem sido desenvolvido e estudado em diversas áreas. Uma dessas áreas é a interligação da biomimética com a robótica, cujo estuda a construção robótica inspirada na movimentação de animais, também conhecido como robôs ambulantes biomiméticos.

O presente trabalho foi embasado na movimentação *off-road* baseado no mecanismo de deslocamento animal, para a elaboração de projeto de um robô mecanizado.

### 1.1 Tema

O tema deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um projeto de um mecanismo robô similar a um animal artrópode de seis patas, com a finalidade de se movimentar em terrenos *off-road*.

## 1.2 Delimitação do Tema

Devido às condições sanitárias de momento, pandemia da Covid-19, o projeto foi todo desenvolvido e estudado em ambiente virtual através do *software Solidworks*.

No desenvolvimento do projeto do mecanismo, não foi desenvolvido um sistema de controle avançado de programação em *arduino*, como comandos de velocidade, comandos de voz e sistema de monitoramento.

Os componentes eletromecânicos, como bateria, motores, *arduino*, pontes e *protoboards*, foram apenas dimensionados e representados na composição do projeto.

Como o trabalho teve ênfase principal no desenvolvimento do mecanismo de movimentação, não foram projetados circuitos elétricos de acionamento e controle.

## 1.3 Problema

Projetar um protótipo de animal robô, por mecanismos de transmissão de engrenagens e correntes e came e seguidor invertidos para a movimentação das pernas, de modo que este protótipo fosse exequível para a movimentação *off-road*.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi projetar um protótipo mecânico baseado em biomimética. Este protótipo é similar a um animal terrestre artrópode de seis patas, com capacidade de se deslocar em terrenos não pavimentados.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Desenvolver um estudo de mecanismo que pode ser aplicado para se locomover em terrenos *off-road*.
- Projetar, validar e comprovar o funcionamento do protótipo através de simulação gráfica e cálculos.
- Avaliar a resistência mecânica de elementos críticos.

## 1.5 Justificativa

Quando uma pessoa precisa avaliar, pesquisar e investigar locais com terrenos irregulares, inacessíveis e restritos, é preciso pensar em meios de adentrar nesses locais, e uma câmera acoplada a um mecanismo robô, seria um meio de utilização segura, ágil e confiável para estas atividades.

Em missões de resgate de acidentes, por exemplo, como desabamentos de prédios, é muito difícil localizar sobreviventes em um curto espaço de tempo, mas com este protótipo de artrópode com uma câmera instalada, adentrando nos escombros, facilitaria a localização de uma vítima com mais facilidade e rapidez.

O robô artrópode pode ser usado em missões de espionagem para os exércitos com a finalidade de saber localização do inimigo. Também para serviços especiais para polícia, como investigação de locais de grupos criminosos. Para estes dois casos o mecanismo se deslocaria em locais estratégicos, serviria como um espião camuflado.

Outra justificativa seria realizar mapeamento de lugares cobertos como cavernas e áreas de mineração. Com a utilização de um robô, facilitaria a investigação do local, e garantiria a segurança de quem fosse entrar no local.

Quando se quer realizar uma exploração de lugares com temperaturas extremas, como, por exemplo, em geleiras, é difícil para um ser humano caminhar devido às condições desfavoráveis do lugar, como o acúmulo de neve, e pelas temperaturas baixas. O mecanismo robô auxiliaria para a exploração desses lugares nessas condições desfavoráveis.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que se pudesse construir um mecanismo de locomoção mecânico baseado em animal terrestre, foi estudado os sistemas de movimentação de veículos em terrenos irregulares, os sistemas de movimentação de animais terrestres e o que já foi desenvolvido de mecanismos de movimentação baseado em animais.

### 2.1 Sistemas de Movimentação de Veículos *Off-road*

Quando se avalia o desempenho de um veículo *off-road*, se verifica a potência, torque do motor, velocidade máxima, aceleração e outras características fundamentais. Entretanto, todas essas características não seriam úteis sem um sistema de suspensão bem desenvolvido. Este sistema deve desempenhar com eficiência três funções:

- a) isolamento: essa função é relacionada ao conforto dos passageiros durante deslocamento do automóvel. A função do isolamento consiste em amortecer as irregularidades dos terrenos não pavimentados para que as vibrações sejam transferidas ao sistema de suspensão;
- b) aderência: esse aspecto considera a capacidade das rodas se manterem juntas ao solo;
- c) estabilidade: deve propiciar ao veículo capacidade de executar manobras mantendo o veículo ao solo de maneira segura. (SABÓIA FILHO e NABARRETE, 2009).

Para que a suspensão automotiva desempenhe essas funções de maneira eficaz, os modelos desenvolvidos foram baseados em dois princípios físicos básicos: absorção e dissipação de energia. Os componentes elementares da suspensão de um veículo *off-road* são as molas e o amortecedor, cuja função do primeiro é a absorção de energia e o segundo é a dissipação de energia absorvida pela mola. (SABÓIA FILHO e NABARRETE, 2009).

Outra característica importante para os veículos *off-road*, são os ângulos de ataque, de saída e ventral. O de ataque é o ângulo máximo possível para abordar um obstáculo sem danificar o para choque do veículo sendo medido entre o para-choque e a roda dianteira. O ângulo de saída é um ângulo máximo possível para sair de um obstáculo sem danificar o para choque traseiro, é medido entre o para-choque traseiro

e a roda traseira. Já o ângulo ventral é a amplitude central do veículo, é o ângulo entre o espaço das rodas e o centro da zona inferior do veículo. Quanto maior possível for esses ângulos, melhor o desempenho dos veículos. (ANTUNES, 2017)

A Figura 1 mostra um exemplo das medições desses ângulos.

Figura 1 – Ângulos de Aplicação *Off-Road*



Fonte: Antunes (2017)

Outro sistema de movimentação *off-road* conhecido são as esteiras lagartas, cuja movimentação não consiste em um sistema com eixos e suspensão, mas sim baseado no acoplamento de rodas a esteiras.

Na sequência do texto serão descritos alguns exemplos de veículos *off-road*, baseados em suas características principais, como movimentação de quatro e duas rodas e os veículos de esteiras lagartas.

### 2.1.1 Movimentação de Quatro Rodas

O Jipe teve sua origem no início da Segunda Guerra Mundial, cujo requisito era atender o exército americano com um veículo leve com tração nas quatro rodas, de fabricação rápida, acessível em qualquer terreno, atuar como batedor e transportar armamentos. O motor utilizado para este primeiro modelo foi de quatro cilindros, com potência de 33,84 kW a 3500 rpm. (SONNEWEND, 2017).

A Figura 2 mostra o primeiro modelo fabricado na Segunda Guerra Mundial.

Figura 2 – Primeiro Jipe construído modelo *Bantam*



Fonte: Sonnewend, (2017, p. 36)

Com passar dos anos foram desenvolvidos novos modelos, tantos em versões civis como em versões militares, com novas sofisticações elétricas à prova da água, reforços significativos no chassi e na suspensão para terem melhores desempenhos em ambientes úmidos e chuvosos, assim como travessia em rios profundos. (SONNEWEND, 2017).

O modelo CJ-5, como mostra na Figura 3, foi considerado o modelo de maior sucesso por um período de 30 anos (1954 – 1984), por apresentar linhas mais suaves, arredondamento das formas, porta luvas com tampa, para brisas maiores, freio de estacionamento e também distância entre eixos maiores, além de melhorias constantes na mecânica do motor, eixos, transmissões e bancos, fazendo com que o CJ-5 se tornasse o veículo ideal para atividades *off-road*. (SONNEWEND, 2017).

Figura 3 – Jipe modelo CJ-5



Fonte: Sonnewend (2017, p. 711)

A partir de 1986, um novo modelo de Jipe foi ganhando destaque, substituindo os modelos padrões da linha CJ pelos modelos *Wrangler* YJ. Estes novos, no início da produção, eram utilizados tanto em ruas pavimentadas quanto em terrenos irregulares. Para atender aos requisitos de segurança, os Jipes YJ apresentaram freios a disco nas quatro rodas com ABS e assistente de frenagem, controle eletrônico de estabilidade, sistema contra capotamentos e controle de tração. O motor utilizado no Jipe YJ foi o de modelo V-6 de 3,8 litros, capaz de gerar uma potência de 199 cv, ideal para desafios em terrenos irregulares e no asfalto. A tração 4x4 *Command-track* contribuiu para garantir confiabilidade em todos os terrenos. A boa distância do solo mostrou eficiência em enfrentar diferentes ângulos de rampa na hora de transpor em obstáculos altos. (SONNEWEND, 2017).

A Figura 4 mostra um modelo de Jipe *Wrangler* YJ, e a Figura 5 mostra um sistema mecânico deste modelo.

Figura 4 – Modelo Jipe Wrangler YJ



Fonte: Sonnewend (2017, p. 752)

Figura 5 – Sistema mecânico do modelo Wrangler



Fonte: Sonnewend (2017, p. 768)

### 2.1.2 Movimentação duas rodas

As motos *off-road* possuem diversas modalidades como *motocross*, *enduro*, *supercross*, *cross-country* e *trail*. Os pneus são fabricados para tração de terra e as rodas são maiores que as das urbanas para transpor obstáculos de terrenos irregulares. A suspensão tem um curso maior, proporcionando uma altura maior em relação ao solo para absorção de impactos. Outra característica desses modelos são

as relações de marchas curtas e rápidas acelerações, com motores que podem variar de 125 a 600 cilindradas. (SENAI-SP, 2016).

O sistema de suspensão mais utilizado para este modelo é o monochoque, cujo conjunto mola amortecedor fica localizado abaixo do assento do piloto, ou seja, apoiado na viga principal do quadro sob ataque. Este sistema, conforme Viotti (2016), possui maior relação de contato da roda com o chão, dando um maior controle para o piloto e mais aderência com a pista. (DEMBOSKI, 2014).

A Figura 6, mostra um modelo de moto com um sistema de suspensão monochoque, e a Figura 7, mostra um modelo de motocicleta XI 250 off road.

Figura 6 – Motocicleta com sistema de suspensão monochoque (destacado pelo círculo vermelho)



Fonte: Demboski (2014, p. 30)

Figura 7 – Motocicleta off road modelo XI 250



Fonte: Honda (2019)

### 2.1.3 Movimentação Esteira lagarta

Os veículos com lagartas mecânicas têm vantagem, em relação aos convencionais, de percorrer em terrenos macios, de baixo atrito e acidentados. Isso devido ao peso do veículo se distribuir a uma área consideravelmente maior, reduzindo a pressão sobre o solo e aumentando o esforço de tração. Ao mesmo tempo, esses veículos possuem a desvantagem de serem construtivamente mais complexos o que aumenta a probabilidade de falha devido ao número maior de peças mecânicas sujeitas a desgastes mecânicos. Outra desvantagem é que eles apresentam baixas velocidades comparado aos veículos com rodas. Uma característica particular é modo de realização de curvas, diferente do modo dos veículos tradicionais que alternam as posições de um elemento de apoio, os veículos com lagartas utilizam um mecanismo que varia as velocidades das lagartas, possibilitando a realização da curva. (YAMASHITA, 2011).

O princípio de funcionamento básico consiste no acoplamento de esteiras (lagartas) ao um conjunto de rodas interligadas, e deste conjunto uma roda motriz dentada, impulsionada pelo motor, tem a função do encaixe dos dentes nas aberturas da lagarta, permitindo assim o movimento para as rodas de apoio localizadas na base da suspensão. As funções básicas das lagartas são distribuir as forças das rodas de apoio para uma área suficientemente grande para evitar que o veículo afunde permitindo a locomoção e a outra é transmitir ao solo força de tração impulsionadas pelo sistema de propulsão. (YAMASHITA, 2011).

A Figura 8, mostra um esquema básico detalhado da plataforma veicular de lagarta mecânica elaborado por Yamashita.

Figura 8 – Plataforma veicular esquematizada de lagarta mecânica



Fonte: Yamashita, (2011, p. 19)

Entre os veículos blindados militares, os também chamados de tanque ou MBT (*Main Battle Tank*), são os mais conhecidos para aplicação de lagarta mecânica. Tiveram o seu surgimento na Primeira Guerra Mundial construídos a partir de plataforma de tratores. Como os tratores já estavam sendo usados na guerra para o transporte de armamentos e suprimentos, a versatilidade desse mecanismo e a facilidade de se locomover em terrenos acidentados tornaram a lagarta um veículo de condições perfeitas para ser utilizado na guerra na utilização de combate, que com o tempo, com novas sofisticções e adaptações, seria utilizado também na Segunda Guerra Mundial. A Figura 9 mostra um modelo de tanque de guerra brasileiro movido sobre lagarta mecânica. (YAMASHITA, 2011).

Figura 9 – Tanque brasileiro Bernardini MB-3 Tamoyo



Fonte: Forte Jor (2020)

As lagartas mecânicas são usadas em grande escala em máquinas civis, principalmente nas áreas de construção civil e mineração. As mesmas características que as fizeram apropriadas para o uso militar se tornaram também para o uso civil, muitas máquinas de construção e de mineração precisam se locomover em terrenos acidentados onde um veículo com rodas não teria tração suficiente para locomoção e acabaria atolado. (YAMASHITA, 2011)

Os veículos civis com lagarta mecânica mais comuns são as escavadeiras, mas também existem tratores construídos com este sistema mecânico. A Figura 10 mostra um modelo de escavadeira e a Figura 11 um modelo de trator.

Figura 10 – Escavadeira modelo Silver Spade construída pela empresa Bucyrus



Fonte: Yamashita, (2011, p.13)

Figura 11 – Trator modelo Caterpillar D11



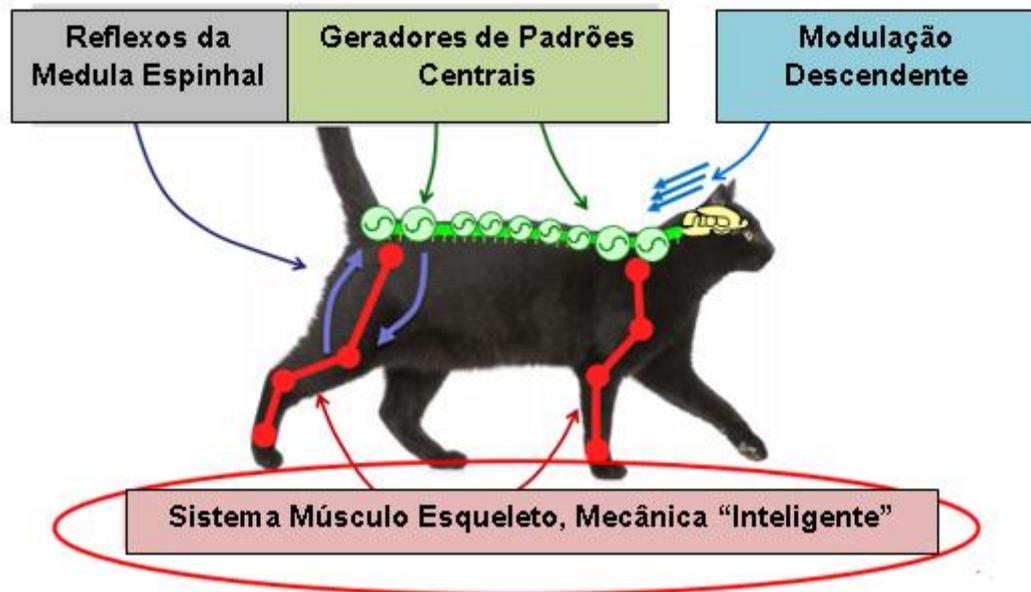
Fonte: Yamashita, (2011, p.14)

## 2.2 Sistemas de Locomoção de Animais Terrestres

Há quatro componentes principais que fazem com que um animal terrestre se locomova. O primeiro é a biomecânica. Segundo é a medula espinhal responsável pelos reflexos e cria um circuito de coordenação sensório-motora nas atividades neurais da medula espinhal e as atividades mecânicas. Terceiro são os geradores centrais de padrões (CPG), localizados na medula espinhal, estes são os circuitos neurais responsáveis por gerar os padrões rítmicos das atividades ordenadas pelo cérebro gerando os movimentos. E por último o cérebro que envia os sinais para os CPG. (IJSPEERT, CRESPI, *et al.*, 2007)

A Figura 12, esquematiza esses quatro sistemas de locomoção em um corpo de um felino.

Figura 12 – Esquematização da locomoção de animal terrestre



Fonte: Ijspeert (2018, p.21)

Porém, deve-se entender que a maioria dos animais deve superar as forças físicas associadas aos ambientes que vivem para se movimentar, e que seus músculos devem gerar força necessária para isso, e que cada movimento requer músculos com propriedades biomecânicas adequadas. A contração muscular fornece a força para a locomoção, mas para animais vertebrados os seus esqueletos são essenciais para estratégias locomotoras, atuando como suporte estrutural e alavancas biomecânicas. Nesta seção será descrito como alguns animais terrestres associam os

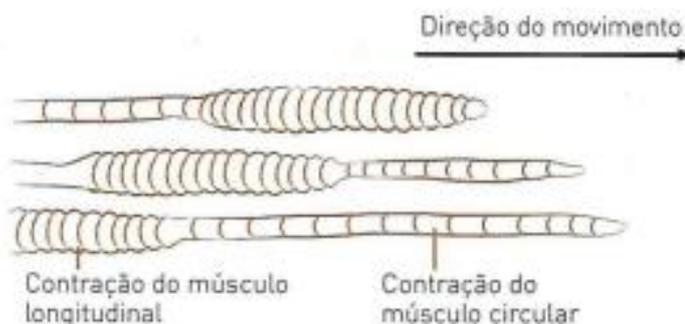
músculos e esqueletos com os sistemas locomotores. A avaliação energética do movimento também é um ponto importante a ser estudado. (MOYES e SCHULTE, 2010)

Os sistemas de locomoção dos animais podem ser através do caminhar, nado, o salto, corrida, rastejo e o voo. Como o foco do trabalho é sobre locomoção em ambiente terrestres, foi enfatizado apenas os sistemas de deslocamentos sobre rastejo, salto, e a caminhada.

### 2.2.1 Rastejo

A maior parte dos animais invertebrados terrestres se locomovem por meio do rastejo. A musculatura desses animais trabalha em conjunto com uma câmara interna que contém um líquido que atua como uma espécie de esqueleto hidrostático. Os músculos dos invertebrados, em sua maioria, são estriados. Para o rastejo acontecer, ocorre uma sobreposição de fibras musculares em camadas, como mostra na Figura 13. (MOYES e SCHULTE, 2010).

Figura 13 – Movimentação de rastejo da minhoca



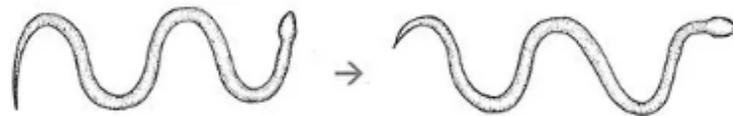
Fonte: Moyes; Schulte, (2010, p.575)

Com relação ao rastejo dos vertebrados, a serpente é o animal que mais caracteriza essa função, diferente de outros répteis, como jacarés, tartarugas e lagartos, que rastejam através das patas, as serpentes rastejam através da sua flexibilidade e extensão de sua coluna vertebral, complexa musculatura, e pela disposição das escamas que são pontos que geram o atrito com o solo que geram a movimentação. (NUNES, 2017).

Os três principais movimentos de rastejo são: ondulatória, concertina e retilíneo.

A forma ondulatória, também chamado movimento serpentino, é a forma de movimento mais comum das serpentes, onde o animal executa-os por ciclos de contrações musculares. A serpente ondula o corpo alternadamente para um lado e para o outro se deslocando para frente como mostra na Figura 14. (NUNES, 2017).

Figura 14 – Movimento ondulatório da Serpente



Fonte: Pontobiologia (2017)

As serpentes utilizam o movimento concertina em lugares estreitos, como as tocas de suas presas, quando não tem como executar o movimento ondulatório. Neste movimento as serpentes pressionam seus músculos nas paredes do local e se deslocam impulsionando-se para frente, como mostra na Figura 15. (NUNES, 2017).

Figura 15 – Movimento concertina



Fonte: Pontobiologia (2017)

O movimento retilíneo é o mais característico nas serpentes maiores que se movem de forma reta e lentamente. A ação dos músculos sobre as escamas provoca ondas sucessivas de contração muscular na pele da serpente, elevando as escamas da pele da frente para trás, fazendo com que a serpente se desloque em linha reta como mostra na Figura 16. (NUNES, 2017)

Figura 16 – Movimento Retilíneo da Serpente



Fonte: Pontobiologia (2017)

### 2.2.2 Caminhada

Para que a locomoção ocorra, há um complexo movimento entre os músculos que se movem de forma coordenada nos segmentos de cada membro do corpo, quando o músculo se dobra em sua articulação, o movimento é chamado extensão, quando ele se endireita é denominado flexão. (MOYES e SCHULTE, 2010).

Para ocorrer os movimentos, o grupo de músculos extensores e o grupo de músculos flexores trabalham sincronizados. No caminhar dos mamíferos, por exemplo, um conjunto de músculos extensores move a pata para frente e outro conjunto de músculos flexores trabalha para ela voltar para trás. (MOYES e SCHULTE, 2010).

É importante salientar, que a maioria dos vertebrados possui um endo esqueleto formado por cartilagens e ossos. Com o crescimento do animal, a cartilagem acaba sendo substituída por tecido ósseo e permanecendo em pouca quantidade na extremidade dos ossos longos, o que implica positivamente na agilidade dos animais. (MOYES e SCHULTE, 2010).

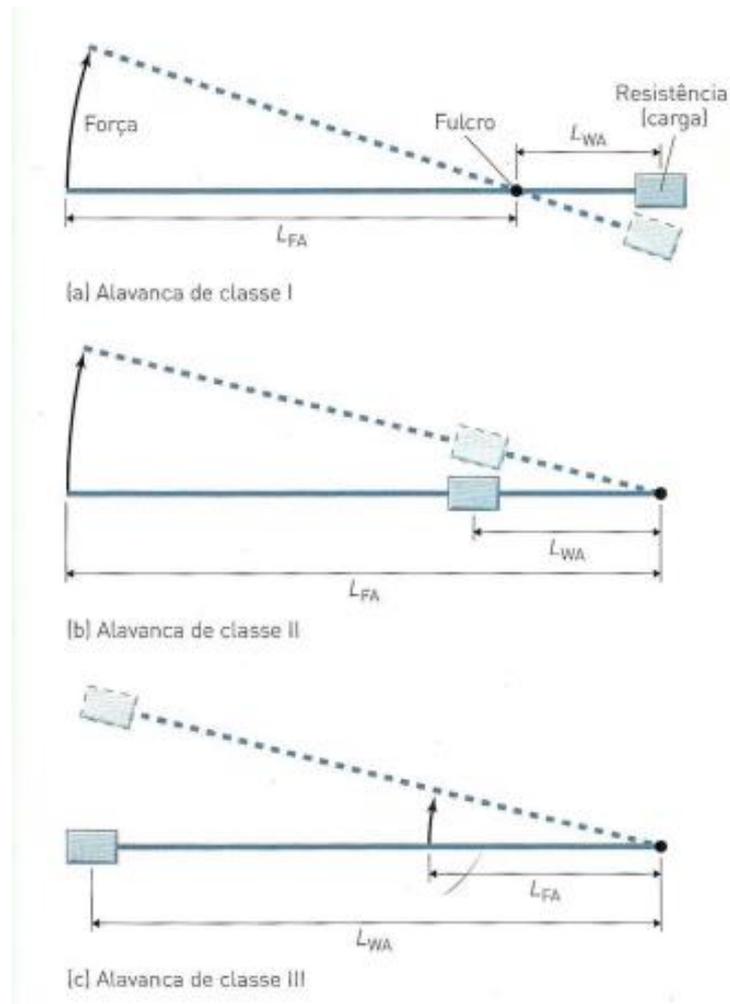
Os tendões e os ligamentos são responsáveis pela união entre os sistemas musculoesqueléticos; sendo o ligamento responsável pela união dos ossos e o tendão responsável por unir o músculo ao esqueleto. Estes dois elementos citados acima contribuem de forma direta na transmissão de forças entre os elementos do sistema todo. (MOYES e SCHULTE, 2010).

As articulações, são responsáveis por reduzir o impacto entre os ossos e respondem pela amplitude dos movimentos. Os músculos com os ossos atuam como alavancas mecânicas. Quando o músculo está em contração, ele puxa o osso ocasionando um giro em forma de arco. Há três elementos existentes em todas as alavancas mecânicas e biológicas: um fulcro, uma resistência e uma força. (MOYES e SCHULTE, 2010).

Segundo Moyes e Schulte, (2010, p. 592), “o fulcro é o ponto de rotação, que no contexto da locomoção é a articulação. A resistência é a força exercida pelo objeto a ser movido. A força é gerada pela contração muscular.” A posição e a distância entre os três elementos citados definem o funcionamento da mecânica da ação. A vantagem mecânica de uma alavanca é explanada como “a razão entre o comprimento da força do braço (LFA) e o comprimento da carga do braço (LWA)”.

A diferenciação das alavancas se baseia na posição dos três elementos, como pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – Alavancas mecânicas de locomoção

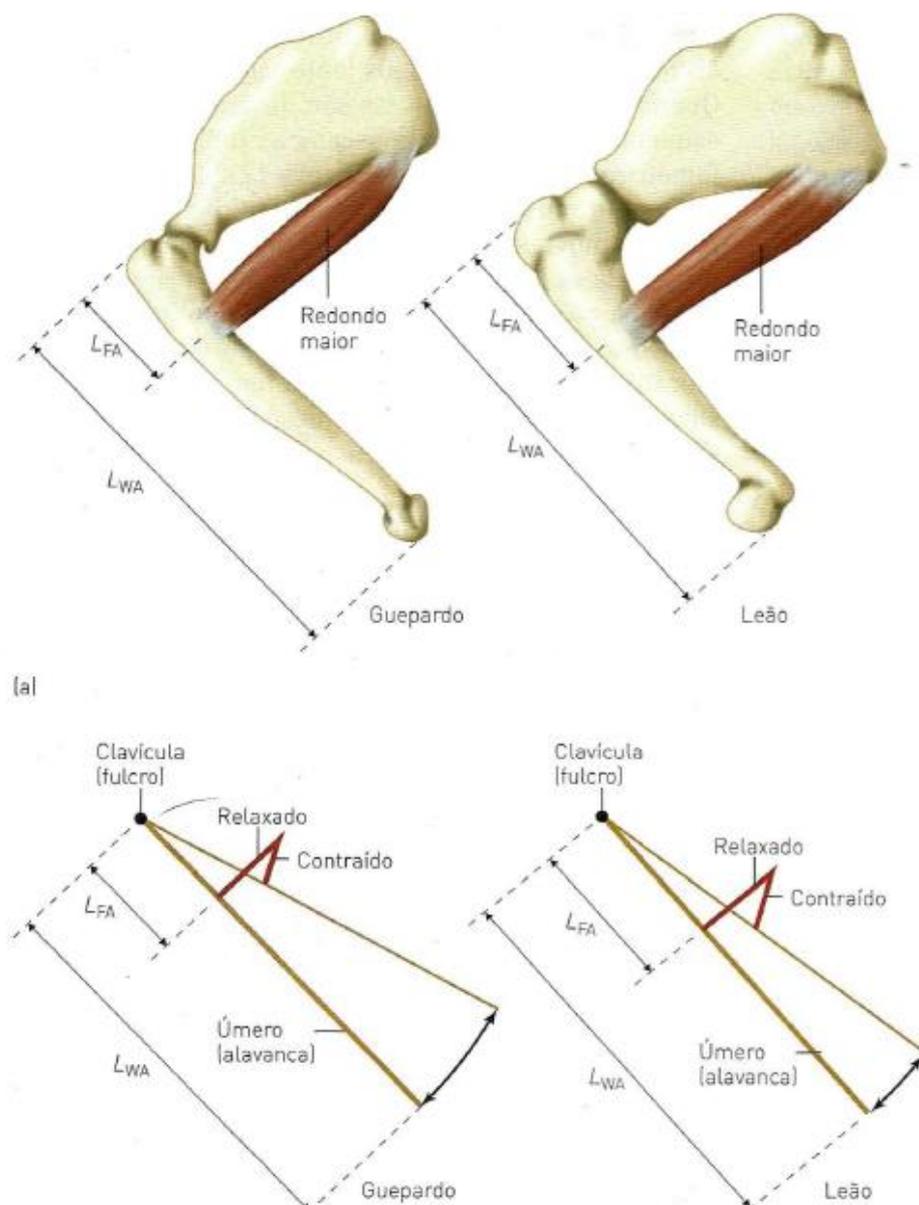


Fonte: Moyes; Schulte, (2010, p.593)

Na alavanca de classe I, temos como exemplo a gangorra, onde  $L_{FA}$  é longo e o fulcro está próximo da carga ( $L_{WA}$  curto). Esta alavanca possui uma grande vantagem mecânica; uma quantidade mínima de força para elevar uma carga grande. Na alavanca de classe II, o carrinho de mão é um exemplo, a carga se encontra entre o fulcro e a força, neste tipo pode-se levantar uma carga, mas não possui a mesma vantagem que a de classe I. E por último a de classe III, que em sua maioria, representa a locomoção dos animais. A exemplo de um braço, o bíceps (força) acaba inserindo-se entre o fulcro e a carga (cotovelo e mão, respectivamente). A alavanca do tipo III não possui vantagem mecânica na tradução de força, porque  $L_{FA}$  sempre acaba sendo menor que o  $L_{WA}$ , porém esta classe é válida pelo aumento de

amplitude e velocidade do movimento quando LFA está próxima do fulcro. A Figura 18 ilustra essa relação comparando a morfometria das patas do leão e do guepardo. Quando as patas dianteiras são desenhadas em um mesmo esquema e escala, fica evidente essas diferenças, cujo redondo maior é o músculo que puxa a pata dianteira para trás caracterizando o movimento da corrida, observando a do guepardo, o músculo está mais próximo da clavícula, diferentemente como ocorre no leão. O resultado dessas diferenças é vantagem mecânica, o guepardo movimenta mais rapidamente suas patas dianteiras e o leão desenvolve mais força. (MOYES e SCHULTE, 2010).

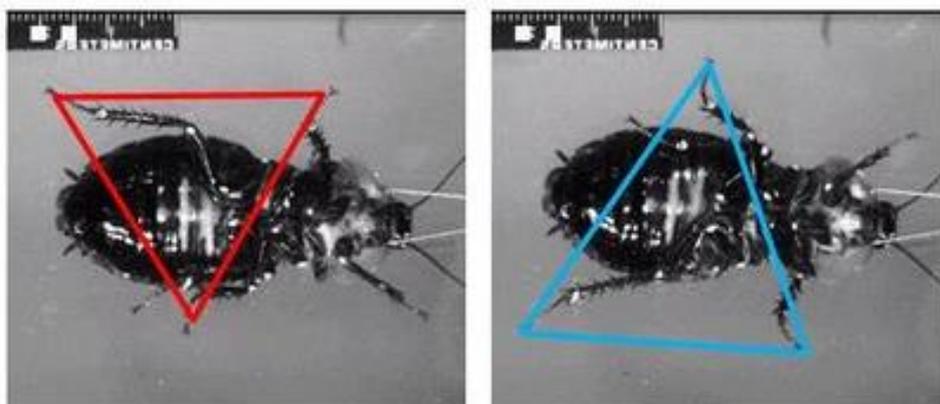
Figura 18 Posição dos Músculos nos Ossos



Fonte: Moyes; Schulte, (2010, p.594)

No andar dos insetos, as pernas seguem um padrão de sincronia movendo as traseiras para o meio depois para as dianteiras de cada lado. Sabendo que os insetos têm 3 pares de pernas, cada perna alterna entre uma fase de apoio em que o pé está no chão, fazendo com que o animal seja empurrado para frente, e uma fase em balanço quando o pé é movido para frente no ar. Em velocidades maiores, o movimento é caracterizado por marcha tripé. Nesta característica as patas traseiras e dianteiras de um lado do animal se movem como uma unidade com a perna do meio no lado oposto. Este tripé, como mostra na Figura 19, alterna entre o balanço e a postura do mesmo formado pelas pernas restantes. Este andar torna o corpo no animal estável durante o seu trajeto, porque na maioria das velocidades o centro de massa permanece na base do tripé fazendo com que o inseto não tombe. (RITZMANN e ZILL, 2013)

Figura 19 – Representação do Modo Tripé de Caminhar dos Insetos



Fonte: Ritizmann (2013)

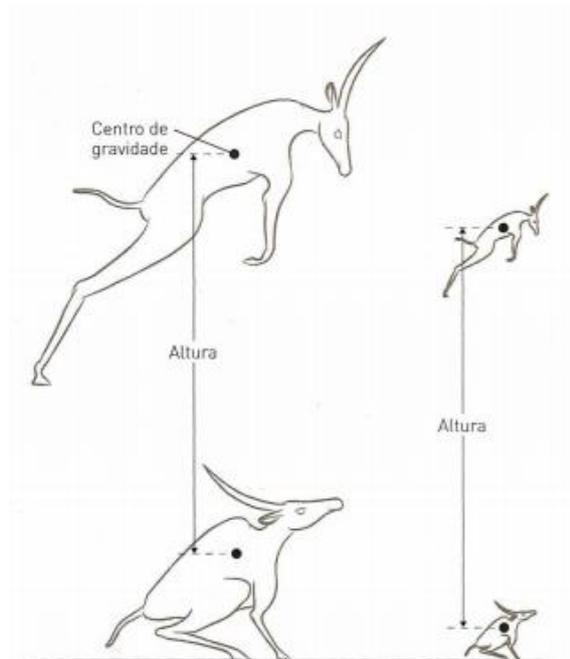
### 2.2.3 Salto

O salto é uma locomoção diferenciada dos animais terrestres que possuem uma anatomia especializada. Animais com pernas mais longas conseguem saltar de forma ampla. Ademais, a velocidade da impulsão interfere na quantidade de saltos possíveis. (MOYES e SCHULTE, 2010).

A geometria das patas e a força dos músculos diferem bons saltadores de ruins saltadores. Animais de tamanhos diferentes, mas com geometria semelhante, conseguem elevar seus centros de gravidades a uma mesma distância durante um salto. O animal grande atinge uma altura maior porque seu centro de massa está mais

afastado em relação ao centro de massa do animal menor. Quando há constância na massa muscular, a velocidade de impulsão de animais grandes e pequenos acaba sendo parecida ao pular a uma mesma altura, como pode ser observado na Figura 20. (MOYES e SCHULTE, 2010).

Figura 20 – Salto do Antílope



Fonte: Moyes; Schulte, (2010, p.612)

Quando um músculo encurta, a força usada no estiramento é armazenada como energia elástica. No salto, os músculos extensores são usados para erguê-lo e na sua queda ao chão, uma força é exercida para a distensão destes músculos, o que acaba gerando um estoque de energia elástica para ser usado no próximo salto. Animais como o canguru, usam essa energia para ter mais eficiência em sua locomoção. (MOYES e SCHULTE, 2010).

### 2.3 Sistema Mecânico de Deslocamento Terrestre Baseado em Animal

Com a evolução da robótica foi possível criar mecanismos de movimentação terrestre baseado em animais, sendo mais conhecidos os robôs fabricados sob quatro patas na intenção de exercer funções para atividades humanas com as características dos animais terrestres.

### 2.3.1 O Robô Quadrupede de Guerra

O robô, LS3, desenvolvido pela empresa americana *Boston Dynamics*, foi elaborado com a finalidade de acompanhar soldados do exército americano e para carregar de suprimentos de até 180 kg em terrenos acidentados, assim liberando os soldados e outros veículos desta função. (MICHAEL, KATINA, 2012)

A visão do projeto do LS3, é combinar as capacidades de um animal de carga com a inteligência de um animal treinado. (MICHAEL, KATINA, 2012)

A Figura 21 mostra esse modelo desenvolvido, percorrendo um terreno irregular.

Figura 21 – Robô Móvel de Guerra Modelo LS3



Fonte: Michael (2012, p. 4)

Além de um veículo de transporte de suprimentos, o LS3 foi projetado para servir como uma máquina para tática de guerra. Nos combates terrestres, por exemplo, o LS3 estaria na linha de frente efetuando os primeiros disparos e sendo o responsável por carregar os armamentos. (MICHAEL, KATINA, 2012).

Com relação ao sistema operacional, o LS3 consegue rastrear comandos visuais e orais através de um computador de bordo, onde possibilita a operação remota. Possui um sistema de controle que mantém o robô em funcionamento e controla a energia dele, que também configura o robô para o funcionamento para uma

determinada condição climática e terrenos acidentados (ambientes frios, quentes, sujos e úmidos). (MICHAEL, KATINA, 2012).

O robô também possui sensores de locomoção que oferecem as posições e forças das juntas, forças de contato com o solo e sensor de carga com o solo. Também possuem outros sensores que monitoram o estado interno do robô, como pressão hidráulica, temperatura do óleo, funções do motor e carga de bateria. (MICHAEL, KATINA, 2012).

Para manter o robô funcionando por bastante tempo, dentro de seu corpo é instalado uma bateria de lítio de longa duração. (MICHAEL, KATINA, 2012).

As pernas do robô são desenvolvidas para uma amplitude de movimento para escaladas através dos acionamentos dos motores elétricos. Essa combinação mecânica das pernas movidas pelos motores elétricos permite que o LS3 possa atingir uma velocidade aproximada de 11 km/h. (MICHAEL, KATINA, 2012).

## 2.4 Estado da Arte

### 2.4.1 Salamandra Robótica

Um projeto chamado Salamandra Robótica I foi desenvolvido pelos engenheiros Auke Jan Ijspeert, Alessandro Crespi, Dimitri Ryczko e Jean-Marie Cabelguen na Suíça no ano de 2007, cujo desenvolveu um robô que caracteriza uma salamandra robótica. Mais tarde, no ano de 2013, desenvolveram o projeto Salamandra Robótica II que seria uma versão melhorada da primeira.

O objetivo destes projetos de robótica, era utilizar a salamandra como um modelo para abordar três questões fundamentais relacionados ao deslocamento deste animal:

- 1- As modificações sofridas pelos circuitos locomotores espinhais durante a transição locomotiva de aquática para a terrestre;
- 2- Os mecanismos necessários para a coordenação do membro e momentos axiais e;
- 3- Os mecanismos que fundamentam as transições de marchas induzidas por estimulação elétrica no tronco encefálico.  
(IJSPEERT, CRESPI, *et al.*, 2007)

A Figura 22 mostra este modelo de robô.

Conseqüentemente, o estudo também foi uma demonstração de como os robôs podem ser usados para testar modelos biológicos, e em troca, como a biologia pode ajudar no projeto de controladores de robôs.

Figura 22 – Salamandra Robótica



Fonte: Ijspeert; Crespi; Ryzszko; Cabelguen (2007 p.1)

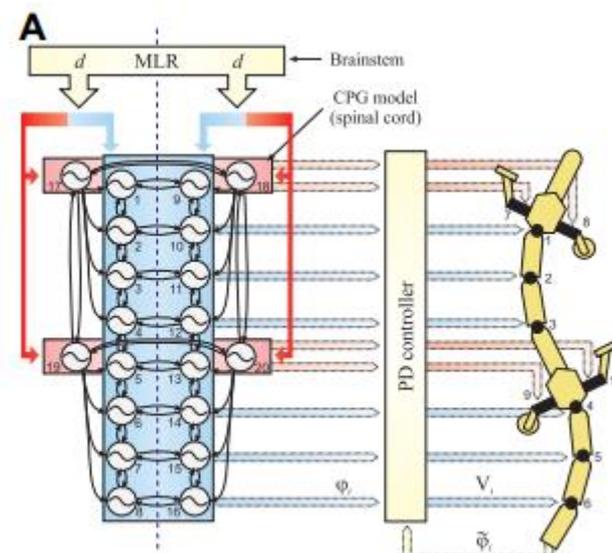
Para falar deste modelo desenvolvido de salamandra robótica, é necessário explicar a característica deste animal. A salamandra é um anfíbio capaz de se locomover entre dois modos: a natação e a caminhada. Na natação o seu corpo se assemelha a de um peixe, ondulando seu corpo para adquirir velocidade e dobrando as partes traseiras. Em terreno firme a salamandra adquire velocidade menor e sua locomoção é através do andar, típico dos tetrápodes. Como em todos os animais vertebrados, na sua medula espinhal é distribuído geradores centrais de padrão (CPG), sendo estes, redes de neurônios interligadas ao sistema nervoso central. (IJSPEERT, CRESPI, *et al.*, 2007)

O princípio de funcionamento é baseado no sistema da medula espinhal, mencionado no tópico 2.2. O robô é acionado por dez motores DC, sendo que seis atuam nas articulações da coluna e quatro para junção de rotação dos membros. Nas articulações da coluna, é montado um corpo de CPG com dezesseis osciladores de frequência para os acionamentos dos motores. E para os membros, um CPG com quatro osciladores para os acionamentos dos motores dos membros. (IJSPEERT, CRESPI, *et al.*, 2007)

O robô é controlado por um controlador remoto, que determina as frequências de movimentos e os torques dos motores. A velocidade dos motores, direções e marchas são emitidos pelos sinais dos controladores e são modificados conforme o movimento, se o robô efetuar o nado, as velocidades dos motores serão maiores, e para os movimentos dos membros em terrenos, as velocidades serão menores. (IJSPEERT, CRESPI, *et al.*, 2007)

A Figura 23 mostra essa configuração do movimento da Salamandra robótica.

Figura 23 – Configuração do controle da Salamandra Robótica



Fonte: Ijspeert; Crespi; Ryzsko; Cabelguen (2007 p.1)

### 3 METODOLOGIA

A metodologia elaborada para este trabalho é mostrada no fluxograma da Figura 24.

Figura 24 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 3.1 Objetivo

O objetivo era projetar um protótipo de movimentação baseado no mecanismo corporal de um artrópode de seis pernas, com base no mecanismo de transmissão de engrenagens e correntes com o movimento de came e seguidor invertido para o movimento das pernas.

#### 3.2 Requisitos

Para o desenvolvimento do projeto, o protótipo apresenta os seguintes requisitos:

- O projeto prevê espaçamento suficiente para alojar seis engrenagens, dois motores com caixa redutora, correntes, mancais, componentes elétricos, duas baterias e a câmera de filmagem *Go Pro*.
- O artrópode mecânico é sustentado por três pares de pernas, seguindo as características corporais dos insetos.
- Na sua movimentação, o robô deve ter pelo menos um par de pernas ao solo, de modo a garantir que ele se mantenha equilibrado durante seu trajeto.

- As pernas e os eixos devem ter resistência mecânicas suficientes para sustentar o peso do protótipo e as cargas solicitadas.

### 3.3 Concepção

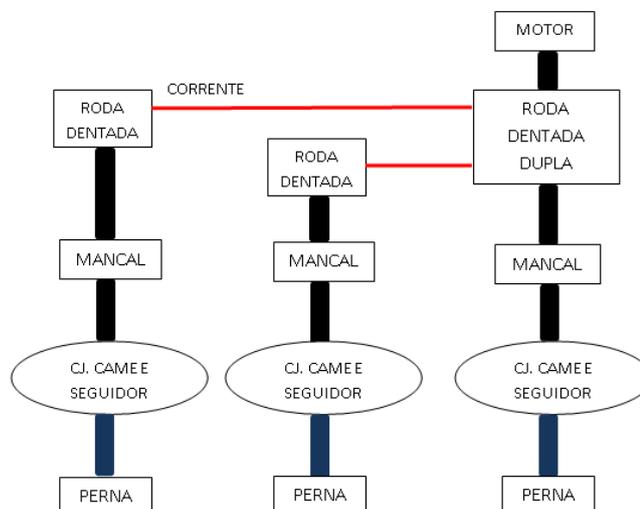
A concepção consistiu no modelo dos corpos dos insetos artrópodes de seis pernas como os besouros, formigas e gafanhotos.

O movimento das pernas deverá ser efetuado pelo movimento de translação de came e seguidor invertido, sendo que as pernas seriam fixas nos eixos dos seguidores.

#### 3.3.1 Concepção geral do mecanismo

No projeto do artrópode mecânico, o movimento é exercido por dois motores, um montado no lado direito e o outro no lado esquerdo, para realizar um movimento de giro para as engrenagens motoras dentadas duplas cujo transmite movimento, por correntes, para as engrenagens movidas. No total, serão três acoplamentos de eixos, cuja montagem é por engrenagens, mancais e os conjuntos de pares seguidores, sendo este último que percorre as cames exercendo a movimentação das pernas. A Figura 25 detalha, por um fluxograma a concepção do mecanismo de funcionamento do artrópode, as linhas escuras mostram a conexão por eixo, e as linhas vermelhas indicam a transmissão por corrente.

Figura 25 - Concepção do mecanismo

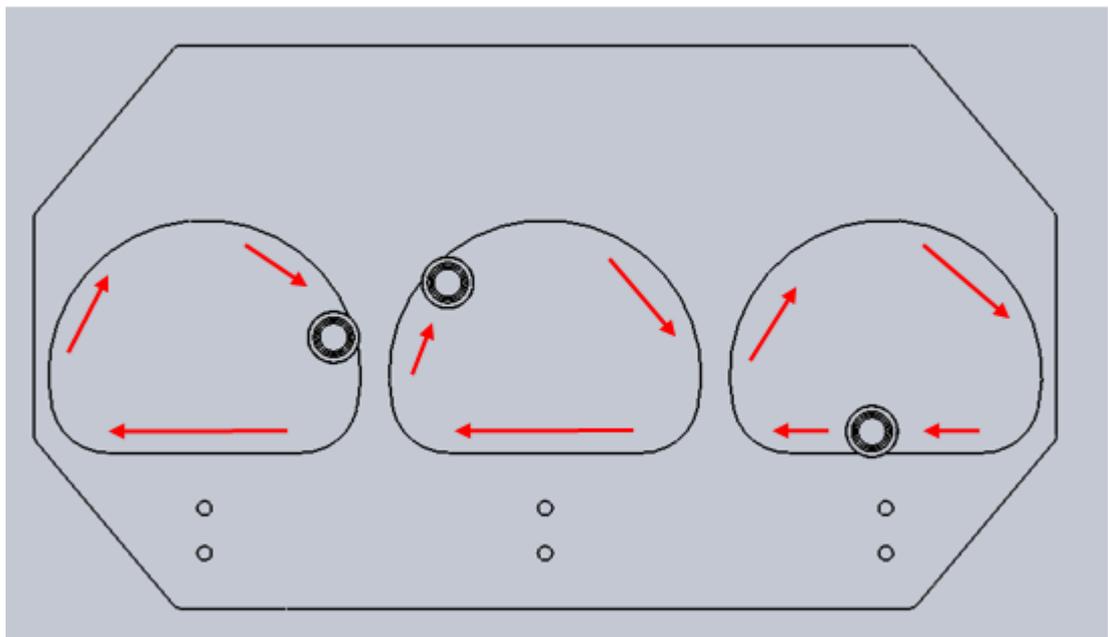


Fonte: Elaborado pelo Autor

### 3.3.1 Concepção movimento das pernas

O sistema de movimentação através de came e seguidor invertido, proporciona o movimento das pernas do robô, de modo, que a movimentação ocorra de forma síncrona fazendo com que o artrópode tenha pelo menos duas patas ao solo durante a rotação do motor e as mantenham, durante um tempo razoável, em contato com o solo. Observando a Figura 26, que mostra a concepção do movimento de came e seguidor invertido, pode-se observar que as comes estão posicionadas a uma certa distância e que o perfil delas são iguais. O perfil das comes consiste um em semicírculo com cantos arredondados nas pontas. Estes raios nas extremidades são importantes para que o seguidor não trave seu deslocamento e mantenha-se encostado na aresta da came. Nas arestas das comes estão posicionados os seguidores que percorrem o movimento de translação. Na primeira came (primeira da direita para esquerda) o seguidor faz o seu percurso na aresta horizontal, sendo neste percurso que uma das patas de um lado do robô vai estar em contato com o solo, simultaneamente com outra pata do lado oposto.

Figura 26 – Concepção Came e Seguidor Invertidos



Fonte: Elaborado pelo autor

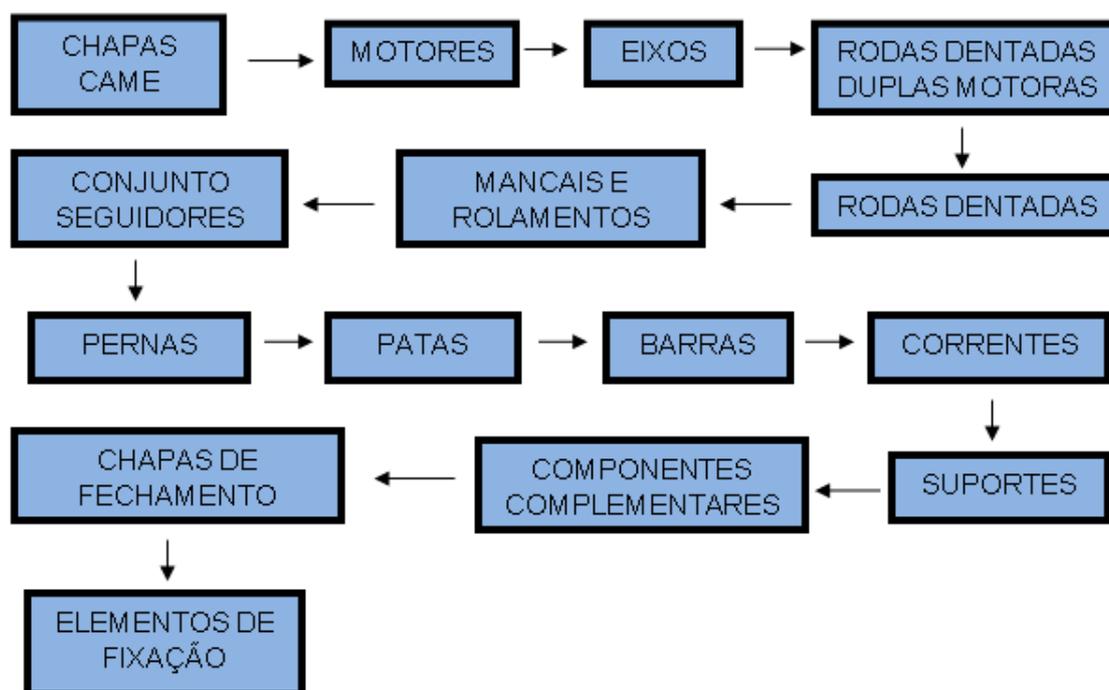
Com relação aos outros dois seguidores, que percorrem as arestas angulares, durante este percurso elas estarão com as pernas suspensas no ar. Como o protótipo

é projetado com três pares de pernas, para elas poderem ter um movimento simultâneo e síncrono, garantindo pelo menos uma pata ao solo durante o percurso, os eixos acoplados no centro das cames vão estar posicionados 120 graus em relação aos eixos dos lados.

## 4. EXECUÇÃO DO PROJETO

O projeto foi modelado no *software Solidworks* e seguiu as etapas de modelamento conforme a Figura 27.

Figura 27 – Etapas do Modelamento



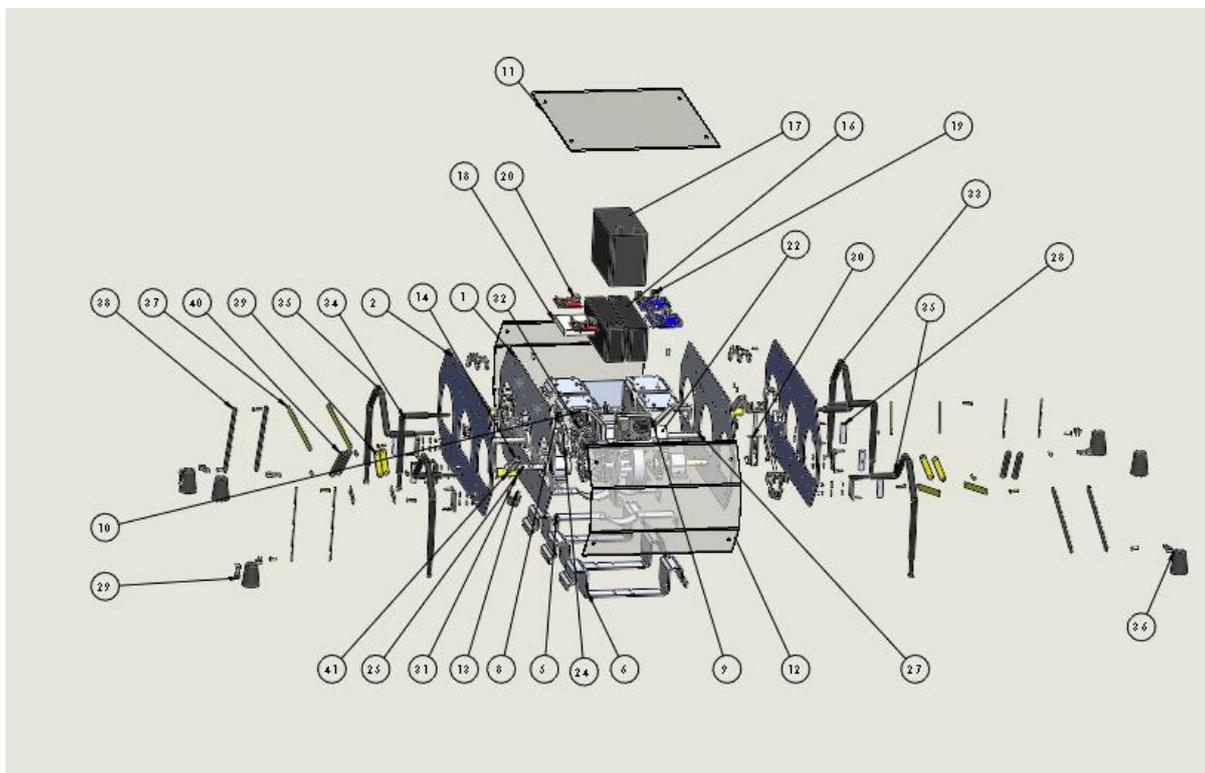
Fonte: Elaborado pelo Autor

### 4.1 Componentes do projeto

A estrutura do projeto é mostrada na Figura 28 em vista explodida com as numerações especificadas dos componentes, e a Tabela 1 mostra as descrições dos itens conforme as numerações indicadas na Figura 28.

Neste subtópico, não será detalhado, apesar de fazerem parte da composição do robô, componentes como os itens eletrônicos, molas e elementos de fixação.

Figura 28 – Vista explodia dos componentes



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 1 – Componentes do Artrópode Mecânico

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE.
1	CHAPA_1CAME	2
2	CHAPA_2CAME	2
3	SUPORE_EIXO_ELOS	6
4	SUPORE_MOTOR	2
5	BASE_SUPORE_MOTOR	2
6	SUPORE_MANCAL	3
7	FLANGE_MOTOR	2
8	MONTAGEM_SUPORE_CENTRAL	2
9	BASE_GOPRO	1
10	SUPORE_GO-PRO	1
11	DOMO_SUPERIOR	1
12	POLICARBONATO	2
13	APOIO_TAMPA	12
14	ASSENTO_SUPERIOR_MOLA	6
15	MOTOR_TEK8_DIREITO	2
16	BATERIA_12V_2,3Ah	2
17	BATERIA_12V9Ah	1
18	PROTOBOARD	1
19	ARDUINO	2
20	PONTE_H_DUPLA	2

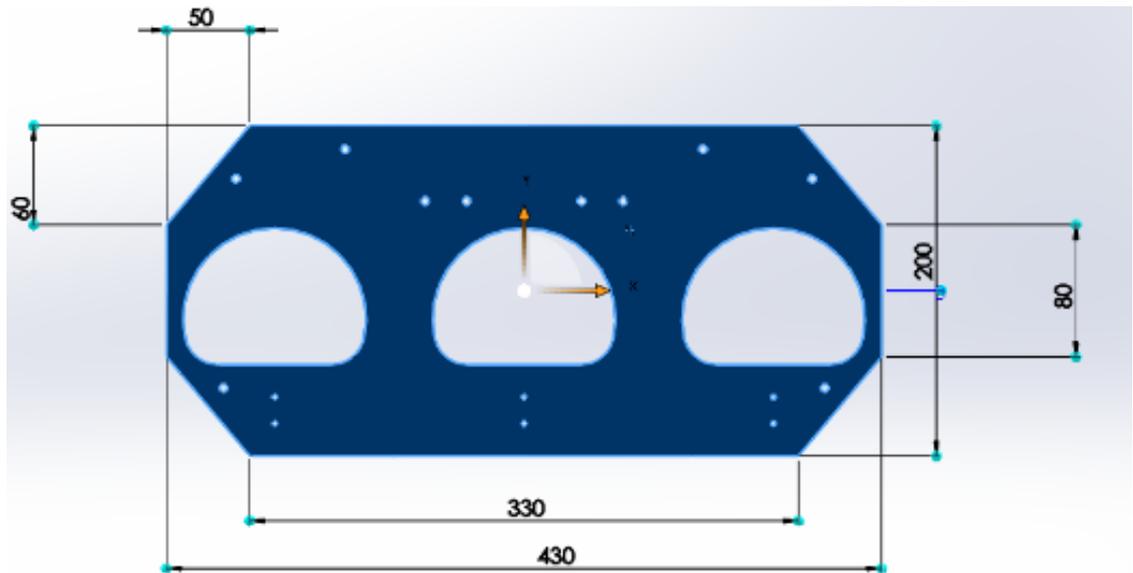
21	GoPro Hero 3	1
22	MANCAL	6
23	ENGRENAGEM_DUPLA	2
24	ENGRENAGEM	4
25	EIXO_SEGUIDOR_MOTOR	2
26	EIXO_SEGUIDOR_MOTOR_MAIOR	2
27	EIXO_SEGUIDOR_MAIOR	2
28	EIXO_ELOS	6
29	MOLA_PATA	6
30	MOLA_SEGUIDOR	6
31	MONTAGEM_SEGUIDORES	6
32	CORRENTE	190
33	PERNA_MAIOR_DIREITA	2
34	PERNA_MEDIANA	2
35	PERNA_MAIOR_ESQUERDA	2
36	PATA	6
37	ELO_BINARIO	8
38	ELO_BINARIO_2	8
39	ELO_BINARIO_MENOR	4
40	ELO_BINARIO_MEDIO	4
41	MONTAGEM_PINO	6

Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.1.1 Chapas Came

Este é um dos componentes mais importante do projeto, pois a função desta chapa é sustentar o corpo do robô e servir de percurso para o seguidor através dos perfis das cames. A Figura 29 mostra o formato dimensional da chapa e a Tabela 2 mostra os dados dimensionais. A fabricação dessa chapa pode ser executada por corte eletrofiado. A justificativa para dois pares de chapas é distribuir a força exercida sobre as pernas para dois seguidores. Observando o dimensional da chapa na Figura 29, se observa que as extremidades das chapas são chanfradas em uma dimensão de 50x60 mm em ângulo de 45°, uma característica similar as dimensões dos blindados como observado na Figura 9, para evidenciar um ângulo de ataque que é característico dos veículos *off-road*.

Figura 29 – Dimensional da chapa came



Fonte: Elaborada pelo Autor

Tabela 2 – Dados Dimensionais da Came

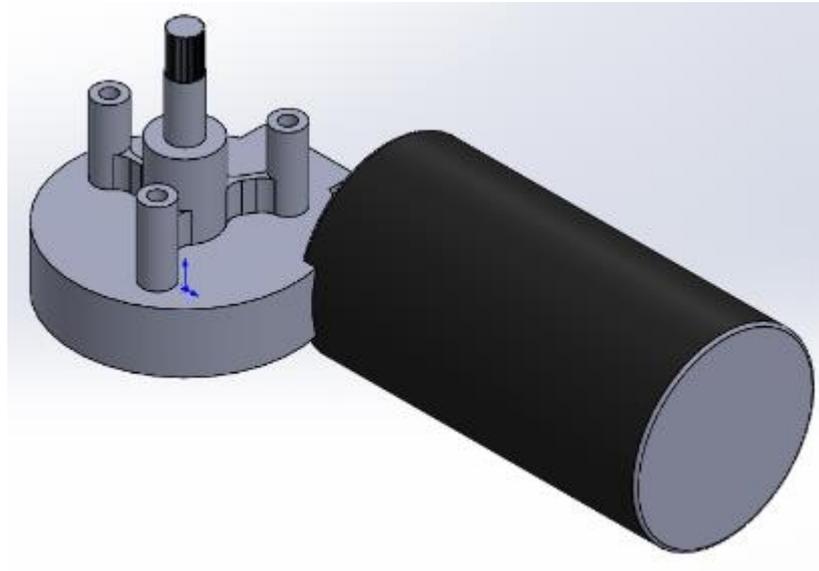
DADOS	VALOR	UNIDADE
Altura	200	mm
Comprimento	430	mm
Espessura	3	mm
Raio Came Maior	55	mm
Raio Came Menor	20	mm
Distância dos Centros das Cames	150	mm
Comprimento Aresta Horizontal da Came	68,27	mm

Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.1.2 Motor

O desenho do motor com caixa de redução é apenas representativo, mas as suas medidas correspondem com as medidas dos motores convencionais como mostra na Tabela 3. A Figura 30 mostra o modelo do motor de alto torque.

Figura 30 – Representação Motor Alto Torque (MB02012)



Fonte: Elaborado por Autor

Tabela 3 – Dados do motor

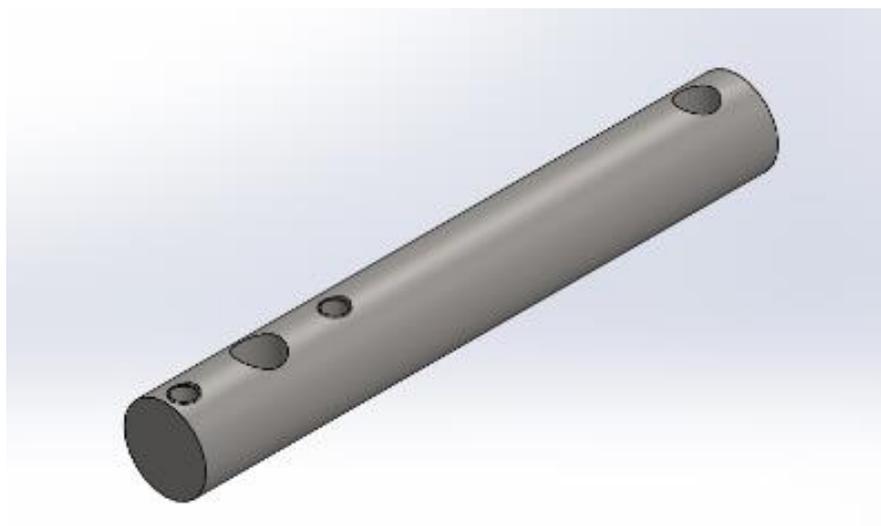
<b>DADOS</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADE</b>
Tensão	12	V
Corrente Máxima	10	A
Velocidade	20	RPM
Torque (nominal)	5	Nm
Torque (Máximo)	22	Nm
Peso	1,5	kg

Fonte: Tek8, ([s.d])

#### 4.1.3 Eixos

Os eixos foram projetados para a acoplagem das engrenagens aos mancais e para servir de apoio ao movimento das molas do seguidor. O material considerado foi de aço AISI/SAE 1020. No total são seis eixos, dois acoplados às engrenagens motoras e os quatro restantes acoplados nas demais engrenagens. A Figura 31 mostra o desenho de um dos eixos.

Figura 31 – Desenho do Eixo Condutor



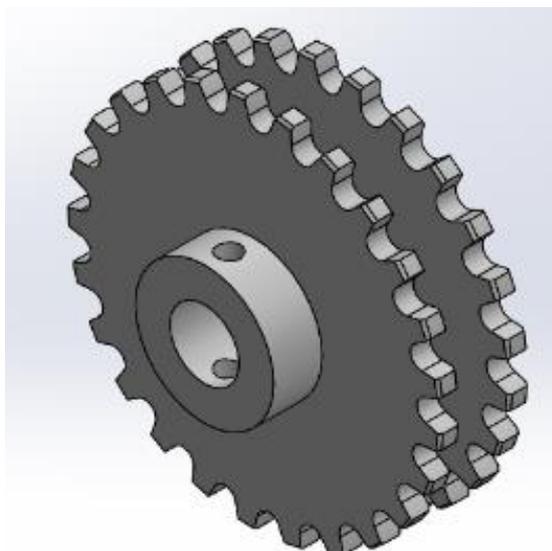
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.3 Roda Dentada Dupla

As rodas dentadas (ou engrenagens) duplas, foram projetadas para a acoplagem com os motores e transmitir, através de correntes, movimento para as engrenagens movidas.

Observando a Figura 32, a roda foi dimensionada com dois jogos de engrenagens simétricas sobre seu eixo e uma furação passante com rosca M4 para fixação com parafusos prisioneiros. A Tabela 4 indica os parâmetros da engrenagem.

Figura 32 – Roda Dentada Dupla



Fonte: Elaborada por Autor

Tabela 4 – Dados da Engrenagem Dupla.

<b>DADOS</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADE</b>
Diâmetro Primitivo	50,6	mm
Diâmetro Maior	53,9	mm
Diâmetro Menor	20	mm
Diâmetro do Furo	10	mm
Módulo	2	mm
Número de Dentes por roda	25	-
Comprimento	26,9	mm
Material	Zinco AC41 A	-
Massa	0,11	kg

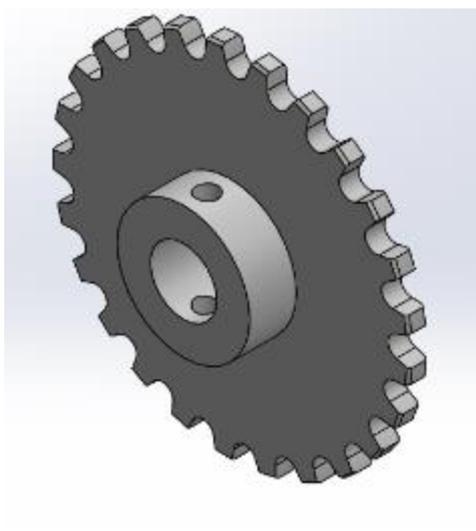
Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 4.1.4 Roda Dentada Movidada

As rodas dentadas movidas foram projetadas com os mesmos parâmetros das engrenagens duplas, porém com apenas um jogo de dentes como mostra na

Figura 33, com um comprimento menor de valor 16,9 mm e massa de 0,06 kg.

Figura 33 – Roda Dentada Movidada

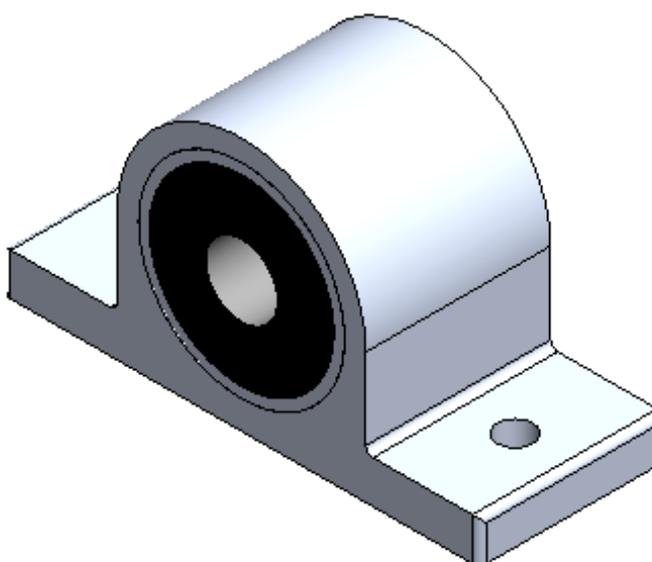


Fonte: Elaborada pelo Autor

#### 4.1.5 Mancais e Rolamentos

Foram projetados, no total, seis conjuntos mancais duplos alojando dois rolamentos em cada. A função desses conjuntos é sustentar e suportar as cargas aplicadas aos eixos citados no tópico 4.1.3. A Figura 34 mostra o conjunto mancal montado com rolamento e a Tabela 5 mostra os dados do conjunto.

Figura 34 – Conjunto Mancal e Rolamentos



Fonte: Elaborado por Autor

Tabela 5 – Dados do Conjunto Mancal Rolamento.

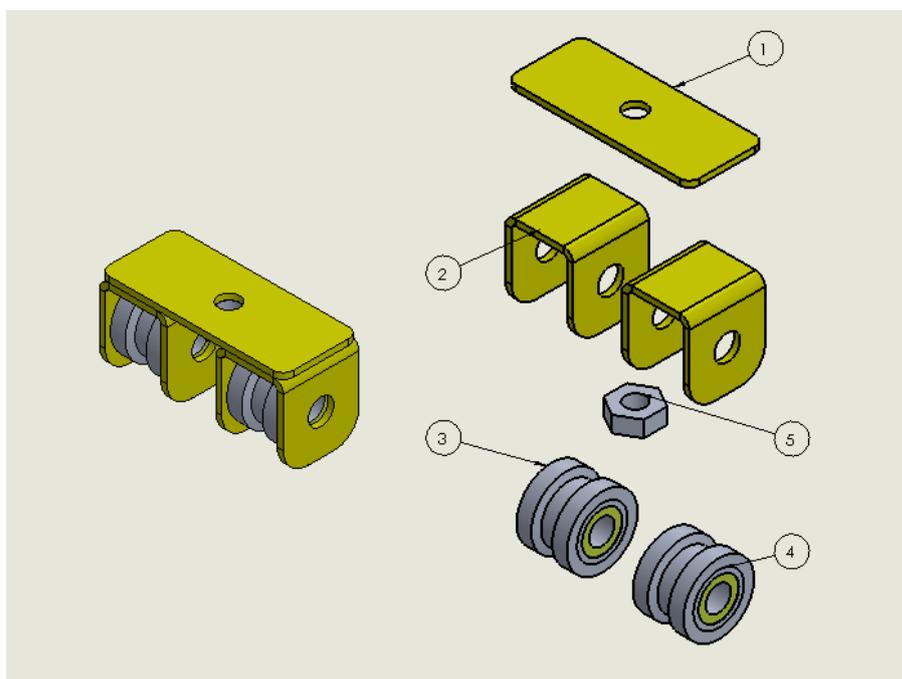
<b>DADOS</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADE</b>
Altura	36	mm
Comprimento	67	mm
Profundidade	26	mm
Material	Alumínio 1060	-
Diâmetro Alojamento do Rolamento	26	mm
Especificação do Rolamento	10268 / 6000	-

Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.1.6 Conjunto Seguidor.

Esse conjunto foi projetado com cinco peças no total. A Figura 35 mostra a vista explodida e a vista montada deste conjunto. No total, foi projetado seis destes conjuntos para o mecanismo, cuja função é acoplar-se as pernas do robô e sustentar os seguidores para o percurso na came.

Figura 35 – Vistas Explodida e Montada do Conjunto Seguidor



Fonte: Elaborado pelo Autor

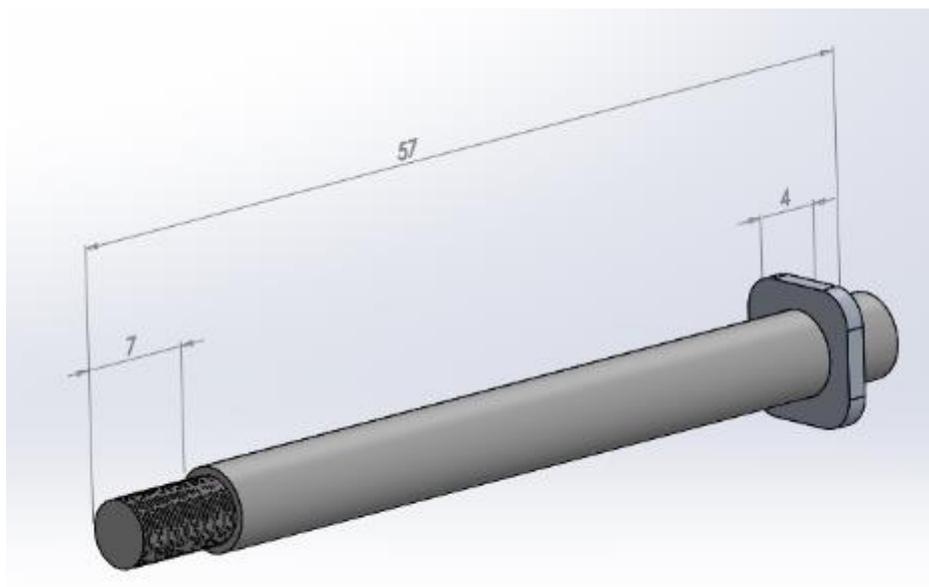
Observando a vista explodida na Figura 35, o componente 1 é a base superior. Nesta base é soldado dois suportes (componente 2) e entre eles, no centro da face inferior da base, é soldado uma porca M4 (componente 5). O componente 3 é o rolete de 14 mm com diâmetro interno de 10 mm que aloja o componente 4 que é o mini rolamento de diâmetro interno de 5 mm, modelo MR105ZZ\_6.

#### 4.1.7 Pino Seguidor

O pino seguidor é montado por rosqueamento com a porca (peça 5) do conjunto seguidor mostrado na Figura 35. Este componente foi projetado para fazer parte do amortecimento da mola, ou seja, servir de guia para a mola durante o percurso dos seguidores. A Figura 36 mostra o pino seguidor projetado com as suas dimensões, a

cota de 7 mm indica a representação da rosca M4 que foi projetada para montar no parafuso do conjunto seguidor, e na sua extremidade é soldada uma chapa retangular para servir de assentamento da mola. O material considerado para o projeto deste pino foi de Aço AISI/SAE 1020.

Figura 36 – Pino Seguidor



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.1.8 Pernas

As pernas foram projetadas para seguirem as características das pernas dos insetos, com exceção das centrais que seguem o formato simples de noventa graus. O material considerado para as pernas foi de Aço AISI/SAE 1020. A Figura 37 representa a perna dianteira esquerda, projetada com as mesmas dimensões das outras pernas montadas nas extremidades.

Figura 37 – Pata Dianteira Esquerda



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observando a Figura 37 observa-se a cota de 38 mm cujo apresenta uma das extremidades da perna com diâmetro de 5 mm, é nesta extremidade que a perna se acopla aos centros dos seguidores mostrado na Figura 35. A outra extremidade, cotado com 34,10 mm, representa a parte que se acopla à pata do artrópode com a mola para amortecimento do conjunto, nesta extremidade, o diâmetro foi dimensionado com rosca M6 para se fixar a uma porca na montagem das patas. O diâmetro maior, que abrange o resto da geometria da perna, é de 10 mm. O processo de fabricação desta parte consiste primeiramente na usinagem, ou seja, nos desbastes das extremidades para os diâmetros finais correspondentes, depois é o processo de dobra através de equipamentos como calandra. A Figura 38 mostra a perna central, esta foi dimensionada diferente das pernas das extremidades, mas seguindo as mesmas características de montagem e processo de fabricação.

Figura 38 – Perna Central

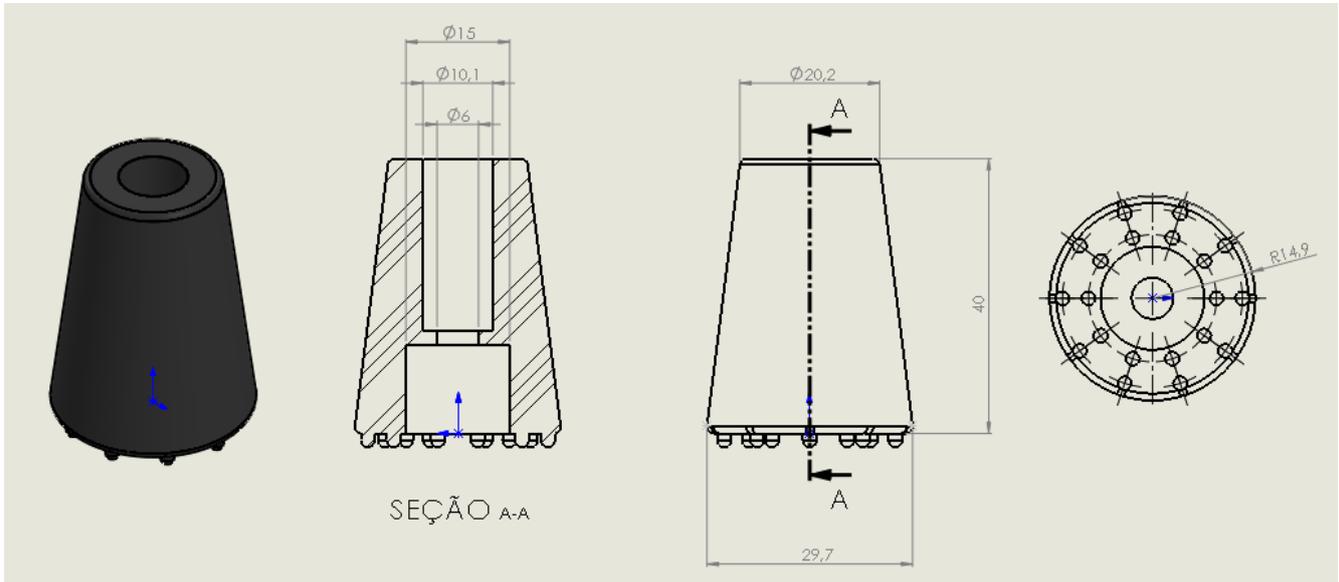


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.1.9 Patas

Como o artrópode mecânico foi projetado para se locomover em terrenos *off-road*, a pata deve ser flexível e o material deve ter propriedades para absorção de impacto. O material selecionado para o projeto da pata, baseado em sapatas de sustentação e calçados para terrenos irregulares, foi de borracha Neoprene. A Figura 39 mostra o detalhamento da pata e a sua vista isométrica. No detalhamento, se observa uma vista segmentada para a visualização da parte interna da pata cujos diâmetros dos furos de 15, 10,1 e 6 milímetros foram projetados prevendo a montagem do sistema de amortecimento característico dos sistemas de veículos *off-road*, como mostrado no tópico 2.1. A última vista mostra a face inferior da pata, nesta se observa pontos de ressaltos que servem para dar estabilidade ao robô durante o seu percurso em terrenos como gramados e areias.

Figura 39 – Detalhamento da Pata do Artrópode Mecânico



Fonte: Elaborado por Autor

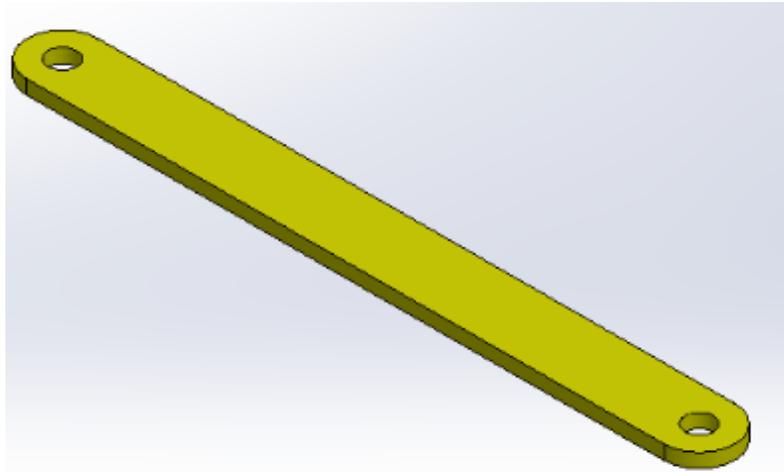
#### 4.1.10 Barras de Articulação

Para que o Artrópode mecânico, durante seu deslocamento, mantenha suas patas paralelas ao solo, foi projetado um sistema de articulação de barras por elos binários, sendo que em cada perna, foi dimensionado dois pares de elos binários montados com pinos. Na seção 4.2 será explicado as etapas de montagem do robô e como os elos são distribuídos em seu mecanismo.

Mecanismos são feitos de elos e juntas, e um elo é um corpo rígido que possui pelo menos dois nós que são pontos para se anexar a outros elos. (NORTON, 2009).

Os elos foram dimensionados com espessuras de 2 mm, diâmetro dos furos de 4 mm e os raios nas extremidades com 5 mm. Na Figura 40 é mostrada a representação de um dos barramentos de articulação.

Figura 40 – Representação do Elo Binário

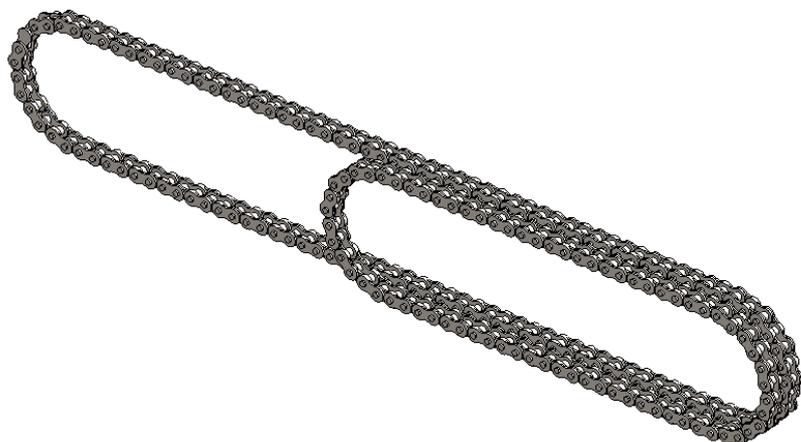


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.1.11 Correntes

A função das correntes é transmitir o movimento das engrenagens motoras para as engrenagens movidas. Como as engrenagens motoras são duplas, ou seja, de dois conjuntos de dentes como mostrado na Figura 32, em cada lado do robô foram projetadas dois pares de conjunto de correntes de rolo como mostra na Figura 41, um jogo de correntes com 36 elos cujo une a engrenagem motora com a engrenagem central, e um segundo jogo com 59 elos para união da roda dentada motora com a do outro extremo.

Figura 41 – Conjunto de Correntes



Fonte: Elaborado pelo Autor

As correntes foram modeladas conforme a norma ANSI, seguindo os dados da tabela da empresa Mov-Máquinas e seguindo os critérios de engrenamento para as engrenagens modeladas no projeto, ou seja, para 25 dentes. A Tabela 6 mostra os dados de fabricação da corrente de rolo.

Tabela 6 – Dados de Projeto da Corrente de Rolo

<b>DADOS</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADE</b>
Passo	6,35	mm
Distância entre as placas	3,30	mm
Diâmetro do Rolo	3,28	mm
Espessura da Placa	0,70	mm
Diâmetro do Pino	2,30	mm

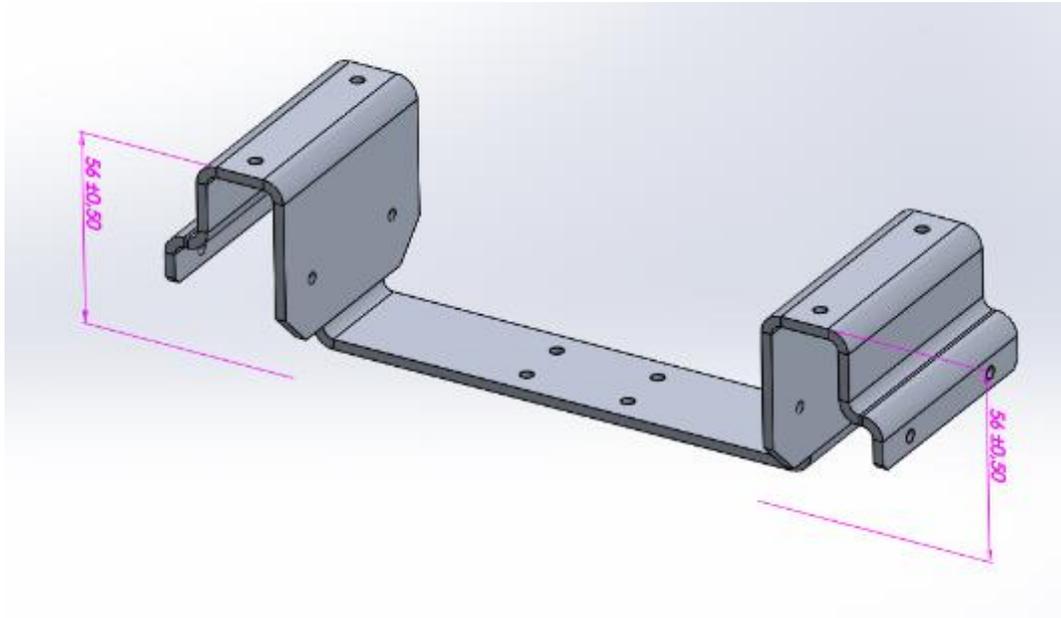
Fonte: Mov-Máquinas (s.d, p. 1)

#### 4.1.12 Suportes

Para a sustentação dos componentes internos do robô, era necessário o modelamento de suportes de fixação, mas além desta justificativa, eles também são importantes, visto que o Artrópode Mecânico foi projetado de forma simétrica, para a união das chapas laterais do robô. Na seção 4.2 é mostrado a etapa de montagem destes componentes evidenciando essa justificativa. Com exceção do suporte que sustenta a câmera filmadora, todos foram modelados com material de alumínio 1060 e espessura de 3 mm.

Para a fixação dos flanges dos motores e dos mancais de apoio, foram projetados ao todo dois destes suportes. Observando a Figura 42 nela é observado duas cotas de 56 mm nas extremidades onde nas faces superiores é montado os mancais de apoio, e nestas faces foram adicionados dois furos com rosca M4 para a fixação dos mancais.

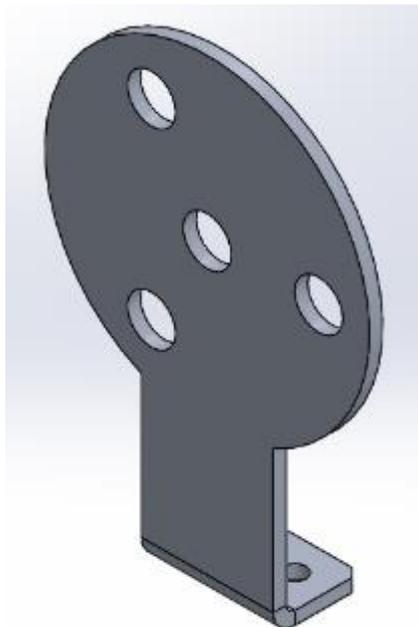
Figura 42 – Suporte Mancal e Motor.



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 43 mostra um flange que foi modelado para fixar-se aos três furos de rosca M5 do motor, e na sua face inferior, fixar-se aos furos da base do suporte da Figura 42.

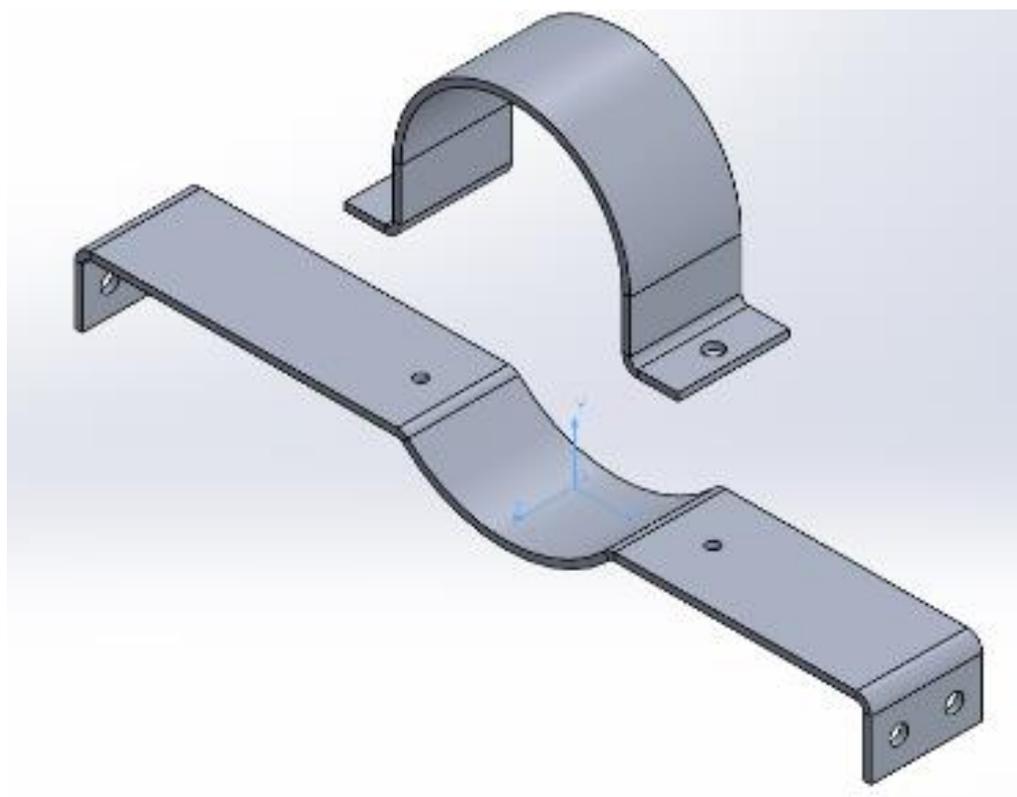
Figura 43 – Flange de Sustentação do Motor



Fonte: Elaborado pelo Autor

O suporte da Figura 44, foi dimensionado para a sustentação da bobina do motor, e como são dois motores, foi modelado dois destes componentes. Para restringir o grau de liberdade no eixo y e evitar vibrações, foi modelado um suporte superior em forma de arco cujo é montado nos furos de rosca M4.

Figura 44 -Componentes Suporte do Motor

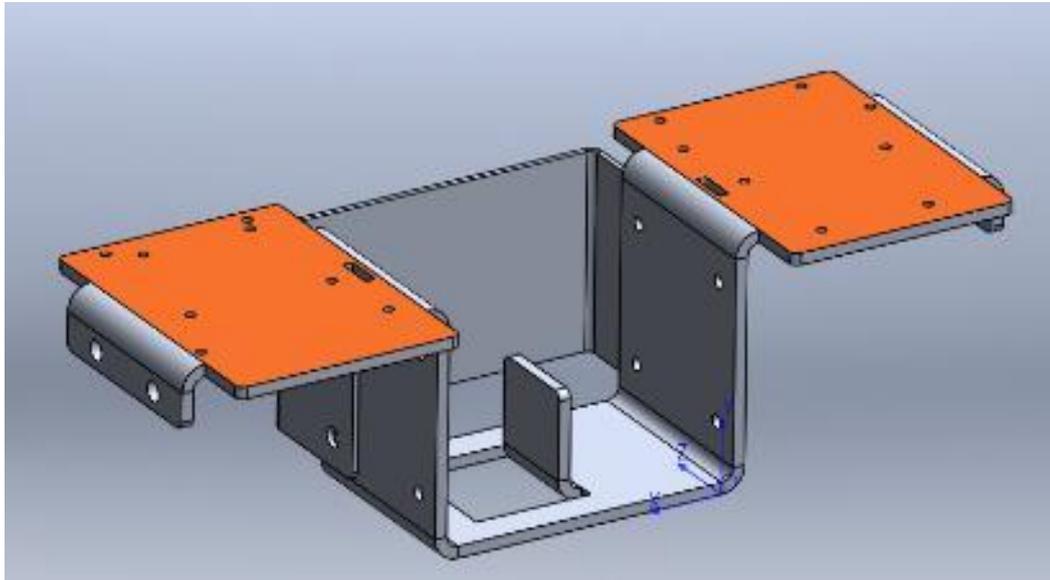


Fonte: Elaborado pelo Autor

Na parte central do Artrópode Mecânico, para a sustentação das baterias e dos demais componentes elétricos, foi modelado um suporte central conforme a Figura 45.

Observando a Figura 45, na face inferior observa-se uma dobra da chapa cuja função é dividir o espaço entre as baterias. Nas faces em laranja é onde são montados os componentes elétricos como *proto-board*, controlador e pontes. A chapa montada na parte posterior do conjunto, foi dimensionada para limitar o grau de liberdade da bateria no eixo z, assegurando a rigidez do componente no mecanismo. Ao todo, foram modelados dois destes suportes no conjunto.

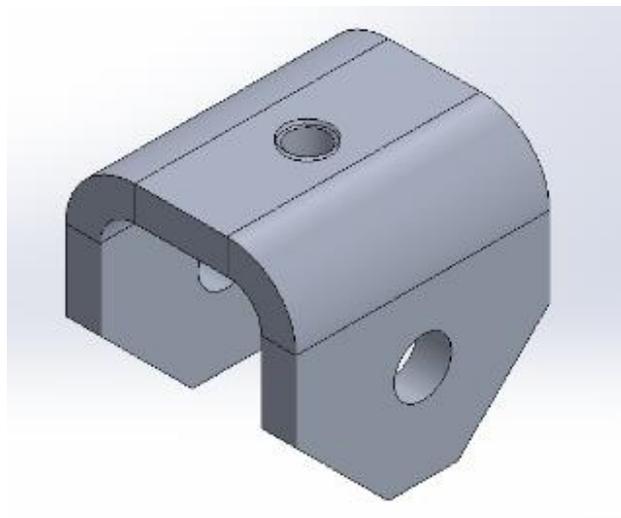
Figura 45 – Suporte Central



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 46, mostra um modelo de suporte com furo de rosca M4 na sua face superior. Este foi modelado para unir os pares de chapas com cames e para prender as chapas de fechamento do robô. O comprimento deste suporte é de 20 mm o que significa o distanciamento na montagem das chapas da came. A altura é de 19,20 mm, espessura de 3 mm e a profundidade é de 22 mm. No total são 12 destes suportes montados no robô.

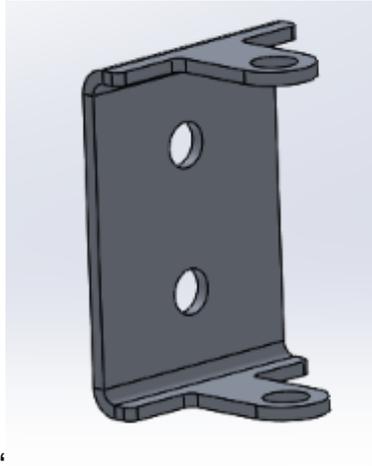
Figura 46 – Suporte Espaçador



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 47 mostra o suporte projetado para ser montado nas laterais do Artrópode Mecânico. Na Figura 29 se observa dois furos de rosca M4 abaixo dos perfis das cames que servem para a fixação destes suportes (Figura 47). A função destes é servir de apoio ao um eixo que fixa os elos binários mencionados no tópico 4.1.10.

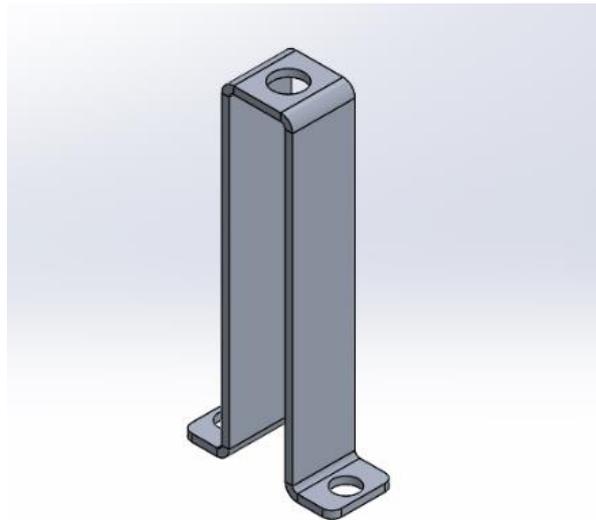
Figura 47 – Suporte do Eixo dos Elos Binários



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 48 mostra a chapa que serve de assentamento da mola do conjunto seguidor.

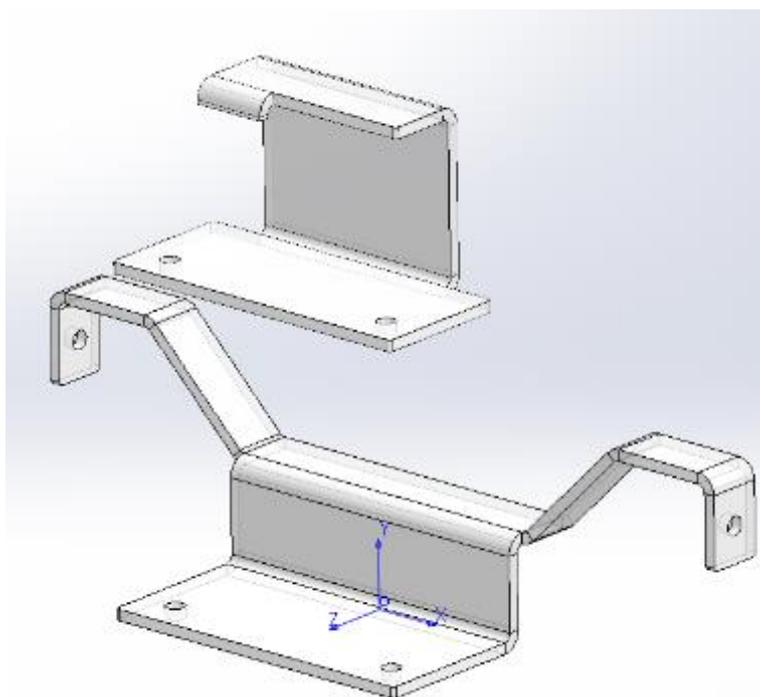
Figura 48 – Chapa de assentamento da Mola



Fonte: Elaborado pelo Autor

E por fim, o suporte para a sustentação da câmera *Go-pro*. Este foi projetado, diferente dos outros suportes, considerando material de Náilon 6 e de espessura de 3 mm. Na Figura 49, o suporte é dividido em duas peças, a peça de baixo é montada, através dos furos nas extremidades, nas chapas laterais do robô, e a que é montada por cima (eixo y) é onde fixa a câmera filmadora.

Figura 49 – Suporte Câmera Go-pro



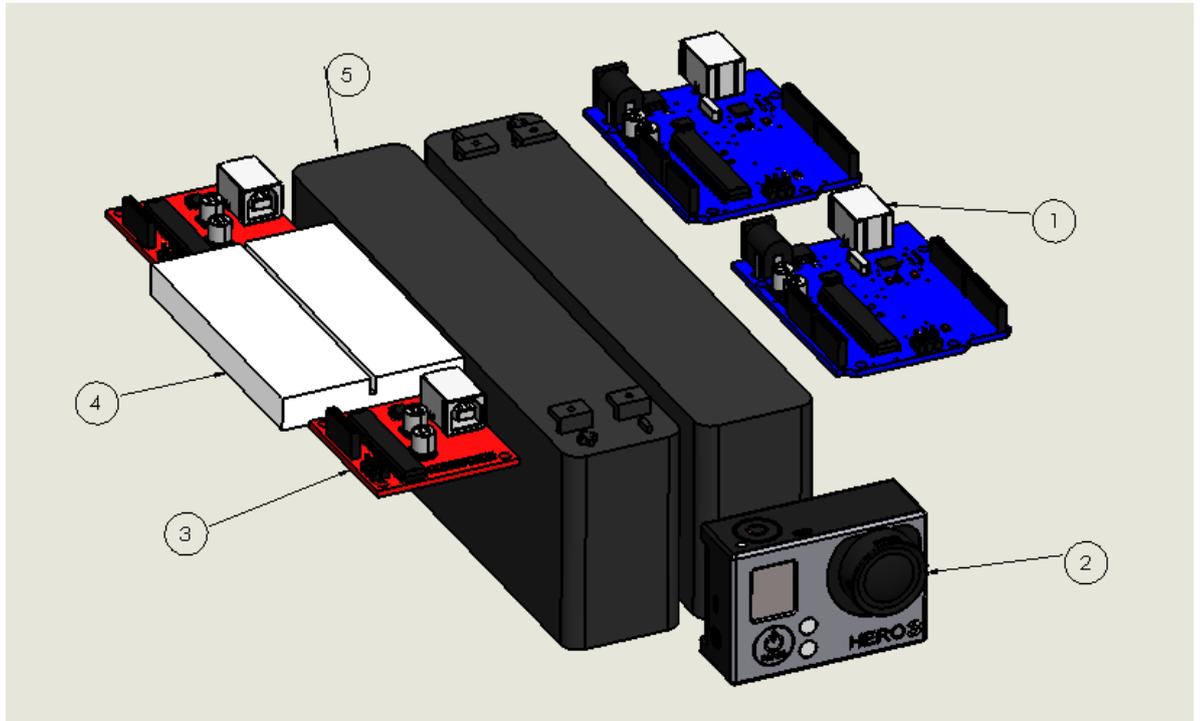
Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.13 Componentes Complementares

Para a montagem final do Robô, era necessário prever o espaçamento para a montagem dos componentes eletroeletrônicos, embora façam parte do escopo do projeto, estes componentes não seguiram os mesmos critérios de dimensionamento dos demais, pois no dimensional modelado são apenas representativos. Embora este trabalho foi todo desenvolvido em ambiente virtual, caso o robô fosse fabricado e fosse testado seu funcionamento, estes componentes seriam fundamentais para o funcionamento do artrópode mecânico, por isso, mesmo em ambiente virtual, era fundamental prever um espaço para a montagem destes componentes. A Figura 50 mostra estes componentes eletroeletrônicos e suas indicações através dos balões

numéricos, e a Tabela 7 mostra a lista destes componentes numerados conforme a Figura 50 com suas respectivas funções.

Figura 50 – Componentes Eletroeletrônicos.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 7 – Lista dos Componentes Eletroeletrônicos

COMPONENTE	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO
1	Arduino	Acionamento de circuitos e comunicação.
2	Câmera Filmadora Go-Pro	Registrar e monitorar o trajeto do Robô
3	Ponte H	Acionamentos dos Motores.
4	Protoboard	Conexão dos fios elétricos para os circuitos eletrônicos.
5	Bateria	Armazenamento de Energia

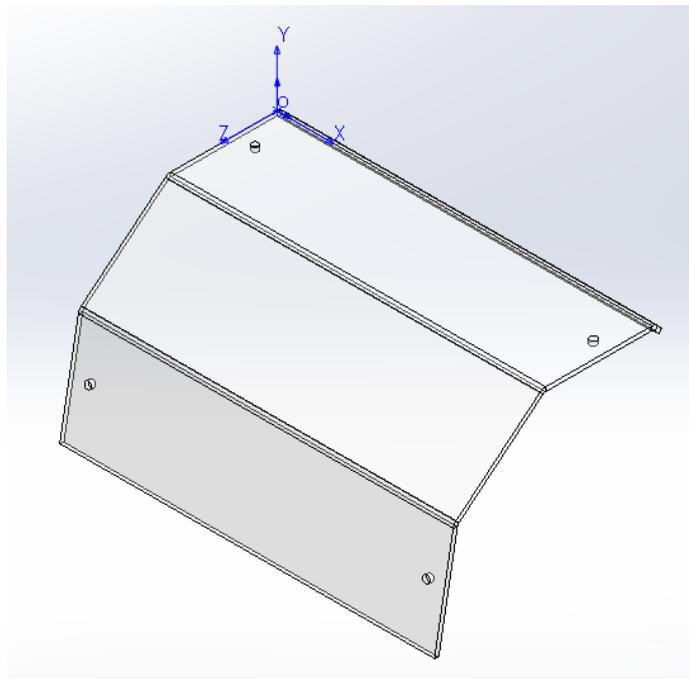
Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.1.14 Chapas de Fechamento

As chapas de fechamento foram modeladas considerando material de policarbonato e espessura de 3 mm. A justificativa para a escolha de material de policarbonato, é que como a função é apenas para fechamento do robô, estas chapas acabam por não serem submetidas a esforços mecânicos. Outro critério é visibilidade dos componentes internos como a câmera filmadora, esta precisa que a parte frontal do artrópode seja visível para o monitoramento dos ambientes externos.

A Figura 51 mostra a chapa de fechamento, ao todo foram especificadas duas destas chapas de fechamento, uma montada na parte frontal e outra na parte traseira, e para a montagem se observa os quatro furos de 5 mm nas faces paralelas aos eixos x, que servem para a passagem dos parafusos M4 para o rosqueamento nas buchas dos suportes mencionados na Figura 46.

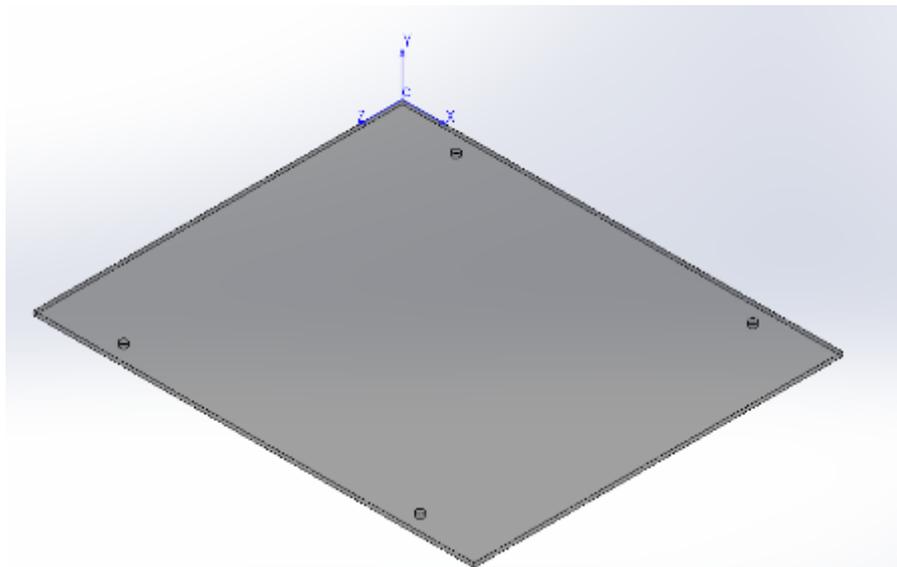
Figura 51 – Chapa de Fechamento Frontal e Traseira



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 52 mostra a chapa de fechamento superior, observa-se que em sua face perpendicular ao eixo y, estão os furos de 5 mm para as fixações de parafusos M4 que, seguindo os mesmos critérios de montagem da chapa de Figura 51, são rosqueados nos suportes representados na Figura 46.

Figura 52 – Chapa de Fechamento Superior



Fonte: Elaborado pelo Autor

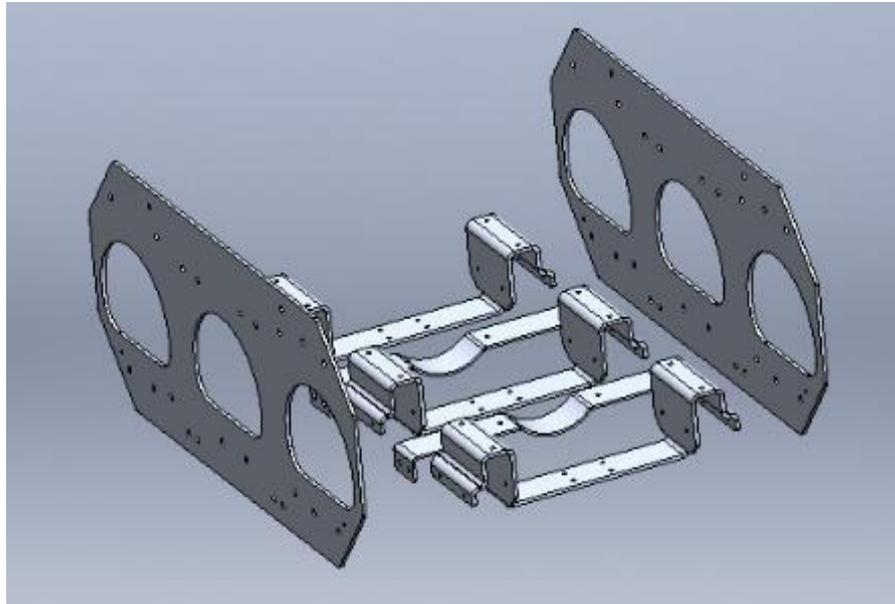
## 4.2 Etapas de Montagem

Com todos os componentes do Artrópode Mecânico dimensionados, é preciso que se evidencie as etapas de montagem do robô, e para isso, a montagem foi dividida em treze etapas. Em cada etapa, foi registrado as montagens através de imagens com vistas explodidas para facilitar a compreensão do leitor.

### 4.2.1 Etapa 1: Montagem dos Suportes Centrais e Chapas Cames

A primeira etapa de montagem consiste na fixação dos suportes centrais (Figura 42 e Figura 44) com as chapas cames internas (Figura 29). Na Figura 53, é mostrada a vista explodida dos componentes evidenciando o posicionamento dos componentes e a fixação é feito por processo de soldagem.

Figura 53 – Etapa de Montagem 1

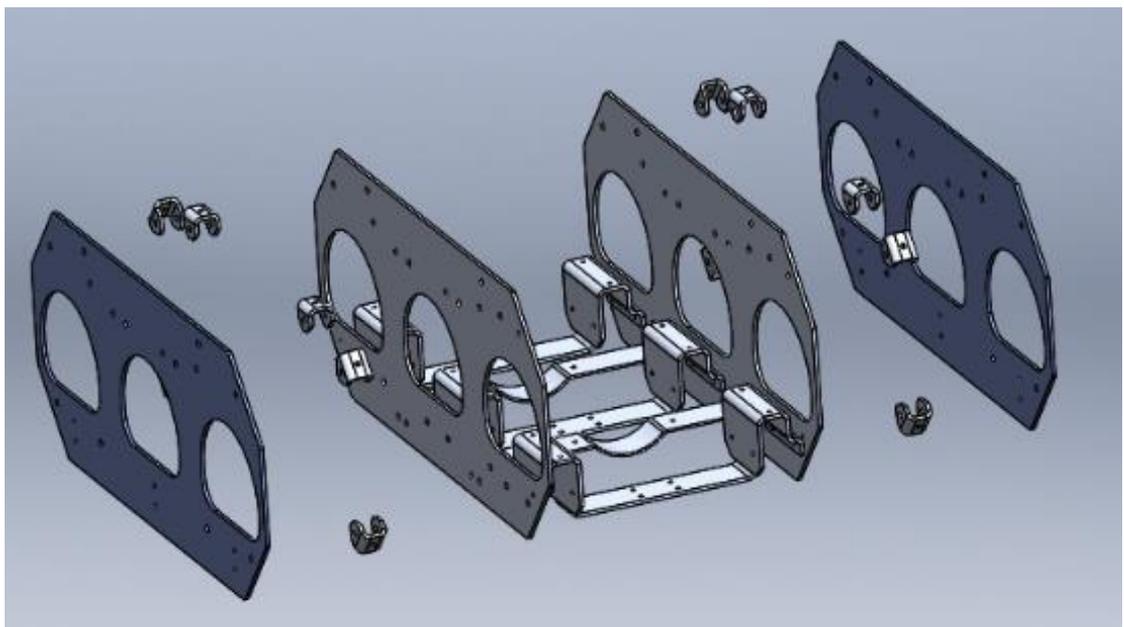


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.2.2 Etapa 2: Montagem das Chapas Laterais

A Figura 54 mostra a união das chapas comes que são unidas através das fixações laterais dos suportes da Figura 46, e a fixação são por pontos de soldagem.

Figura 54 - Etapa de Montagem 2

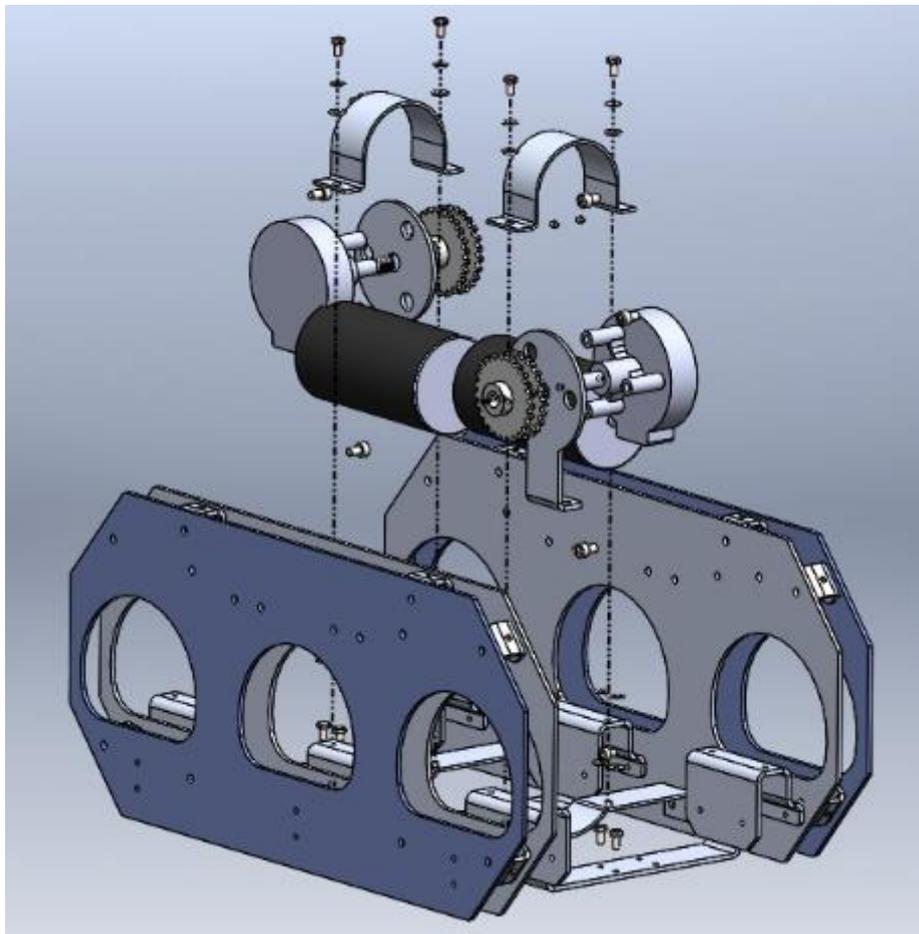


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.2.3 Etapa 3: Montagem dos Motores e Engrenagem Motora

Na terceira etapa de montagem, como mostra a Figura 55, se introduz os motores, os flanges, as engrenagens motoras e os suportes superiores do motor. Primeiramente é montado o flange (Figura 43) ao motor utilizando parafusos M5, depois é acoplada a engrenagem motora ao eixo do motor utilizando parafusos prisioneiros M4, depois o conjunto montado é fixa-se através dos furos do flange por parafusos M4 à base do suporte (Figura 42) e por último o suporte superior do motor (Figura 44) é montado na base.

Figura 55 – Etapa de Montagem 3



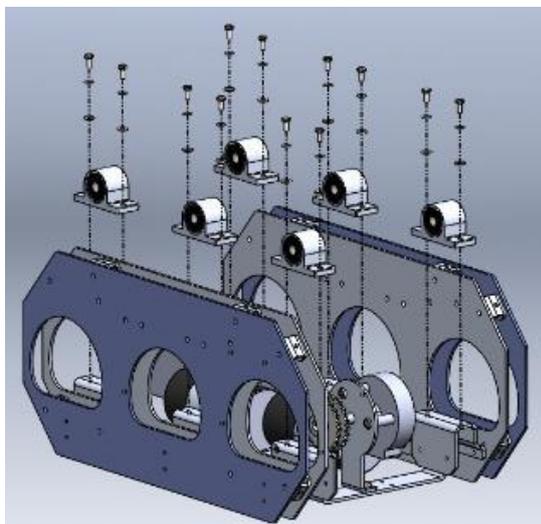
Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.4 Etapa 4: Montagem dos Mancais

Na Figura 56 mostra a vista explodida da etapa de montagem 4, cujo detalha a fixação dos seis mancais de apoio. Sabendo que o suporte da base (Figura 42) tem

furações com rosca M4, a fixação ocorre por meio parafuso M4x10 e arruela lisa de diâmetro interno de 4 mm.

Figura 56 – Etapa de Montagem 4



Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 4.2.5 Etapa 5: Montagem dois Eixos e Engrenagens

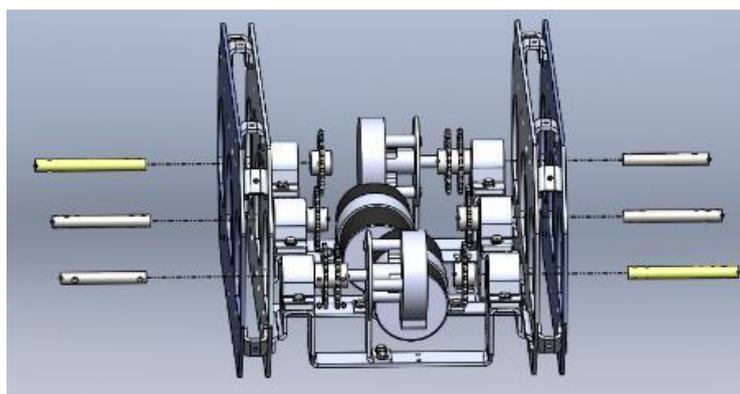
Nesta etapa são introduzidos os eixos de movimentação, mencionados no tópico 4.1.3, com as engrenagens movidas

(Figura 33).

A fixação ocorre através de parafusos prisioneiros M4 das furações com rosca nas engrenagens.

A Figura 57 mostra a vista explodida da etapa desta montagem.

Figura 57 – Etapa de Montagem 5

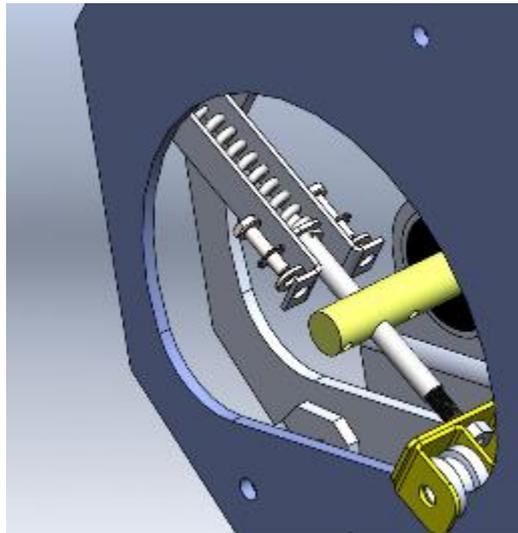


Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 4.2.6 Etapa 6: Montagem dos Seguidores

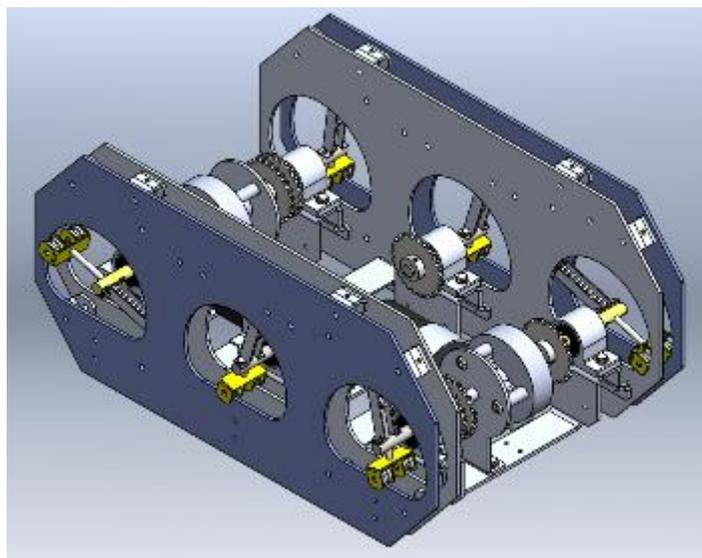
Nesta etapa, são montados os seis conjuntos seguidores (Figura 35) mencionados no tópico 4.1.6, seis molas e os seis pinos (Figura 36) mencionados no tópico 4.1.7. A Figura 58 mostra, por vista explodida, como é feita a montagem em um eixo e a Figura 59 mostra esses componentes montados no robô em vista isométrica.

Figura 58 – Etapa de Montagem 6



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 59 – Visualização dos Conjuntos Seguidores Montados

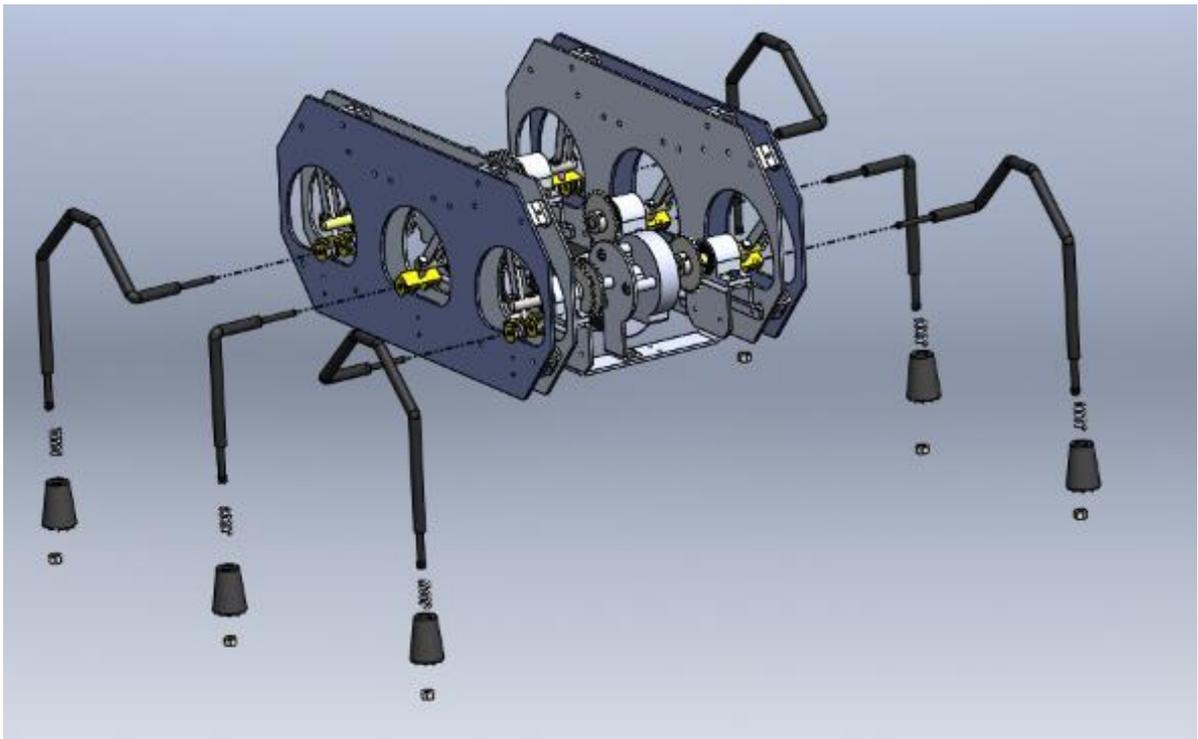


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.2.7 Etapa 7: Montagem das Pernas e Patas

A montagem das pernas e das patas é mostrado Figura 60. Entre as patas e as extremidades das pernas são introduzidas as molas que fazem parte das suspensões do Artrópode Mecânico, e as patas são montadas por porca M6.

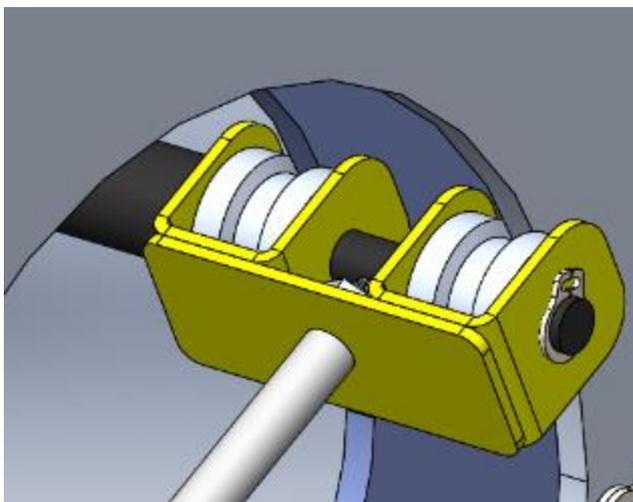
Figura 60 – Etapa de Montagem 7



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 61 mostra a acoplagem da perna ao conjunto seguidor, para a facilitar a compreensão e a visualização da fixação foram ocultos os demais componentes já montados. Nesta montagem se observa o anel elástico montado na extremidade do eixo da perna, sua função é evitar que a perna se desloque para os lados durante o movimento do robô.

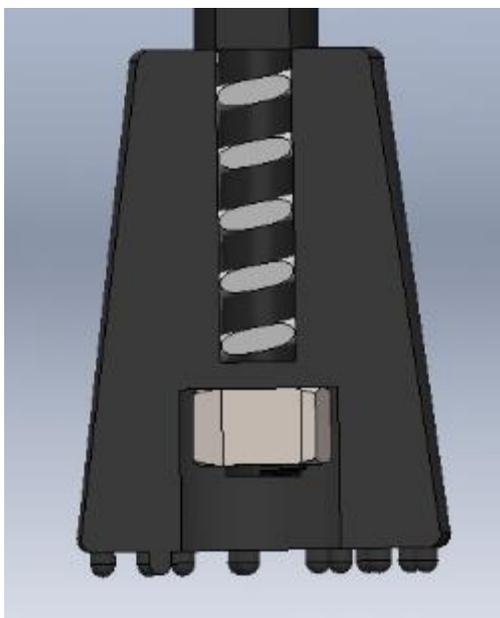
Figura 61 – Acoplamento da Perna



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 62 mostra a fixação de montagem da pata, vista de forma segmentada para visualização interna da montagem.

Figura 62 – Montagem Pata



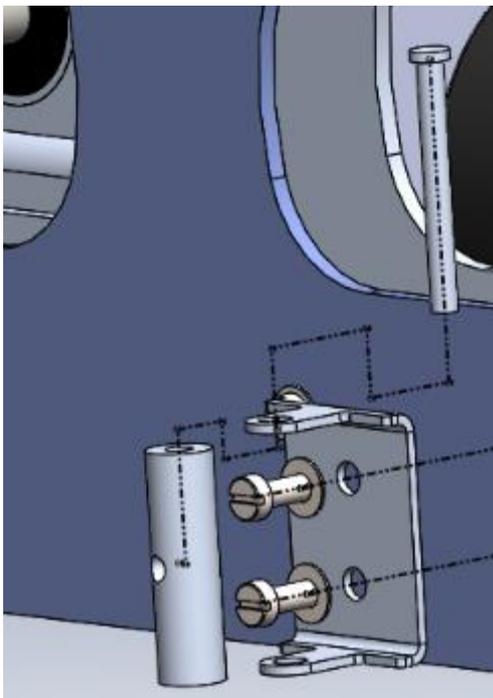
Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.2.8 Etapa 8: Montagem do Suporte dos Elos

A função deste suporte é fixar os barramentos de elos binários (Figura 40) ao um eixo. Observando a Figura 63, o suporte é montado a chapa came, por meio

parafusos e arruelas M4, nos dois furos indicados pela linha tracejada, depois é montado o eixo fixado por um pino de articulação, de modo que este eixo apenas tenha um grau de liberdade de giro.

Figura 63 – Etapa de Montagem 8



Fonte: Elaborado pelo Autor

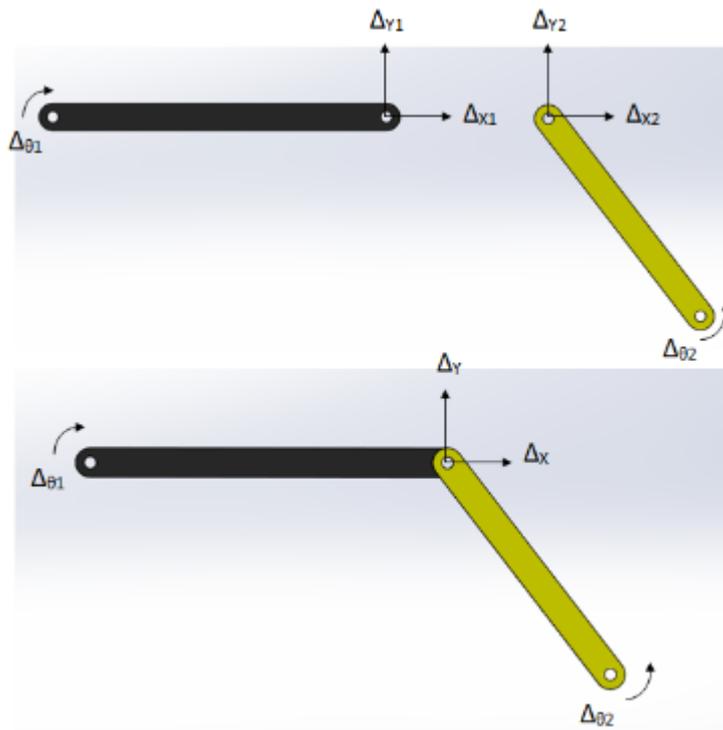
#### 4.2.9 Etapa 9: Montagem do Elos Binários

Os elos binários (Figura 40) foram projetados para serem montados às patas do robô para que ele as mantenha paralelas ao solo durante o seu deslocamento, e no total foram dimensionados vinte e quatro elos, quatro para cada pata.

Quando há conexão entre dois ou mais elos em seus nós, essa conexão é classificada de junta. Um elo quando está em um plano possui três graus de liberdade (GDL), dois elos separados em um mesmo plano possuem juntos seis GDL, mas quando unidos por um nó formando uma junta, dois GDL são removidos formando quatro GDL. (NORTON, 2009).

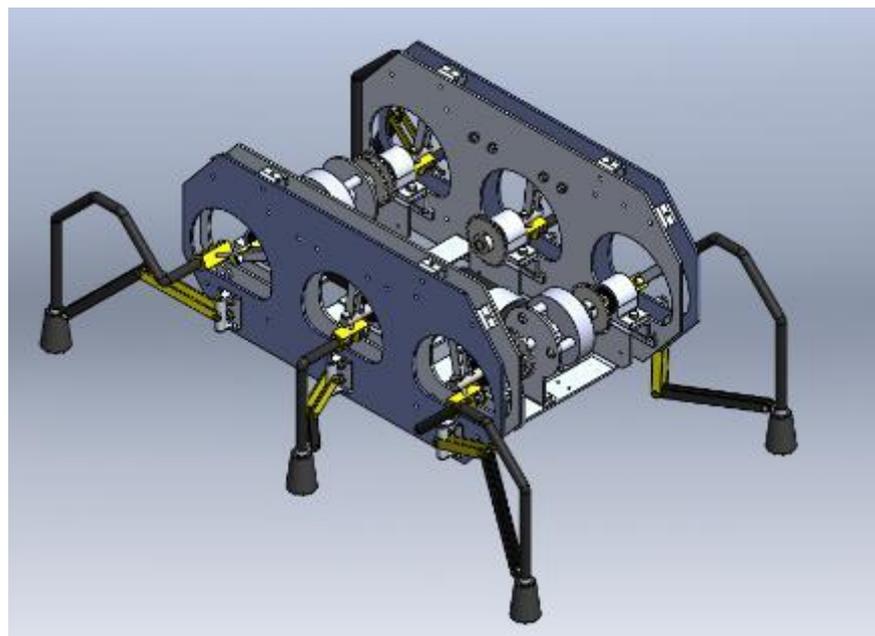
A Figura 64 evidencia, através dos elos binários que compõem o Artrópode Mecânico, a citação do parágrafo anterior e a Figura 65 mostra esses barramentos articulados montados no robô.

Figura 64 – Graus de Liberdade dos Elos Binários e Juntas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 65 – Etapa de Montagem 9

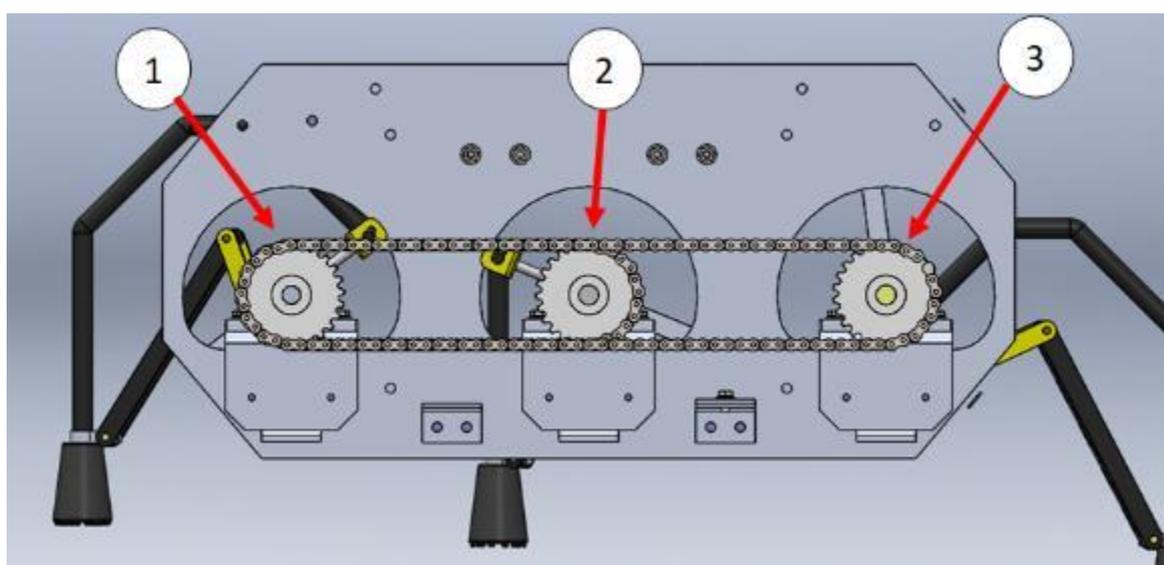


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.2.10 Etapa 10: Montagem das Correntes

Na etapa 10 é montada as correntes de rolo responsáveis pela transmissão do movimento das engrenagens motoras para as engrenagens movidas. Considerando que são duas engrenagens motoras com dentes duplos no total, e que elas engrenam com dois jogos de correntes, no total foram montados quatro jogos de correntes no Artrópode Mecânico. A Figura 66 mostra uma imagem segmentada vista no interior do robô mostrando as correntes montadas nas engrenagens. A engrenagem 1 (indicado na Figura 66) é a motora que transmite o movimento através das correntes para as engrenagens 2 e 3. A montagem de correntes com a combinação das engrenagens 1-2, ocorre com o jogo de correntes de 30 elos. E a montagem com a combinação 1-3 ocorre com o jogo de engrenagens de 60 elos.

Figura 66 – Etapa de Montagem 10

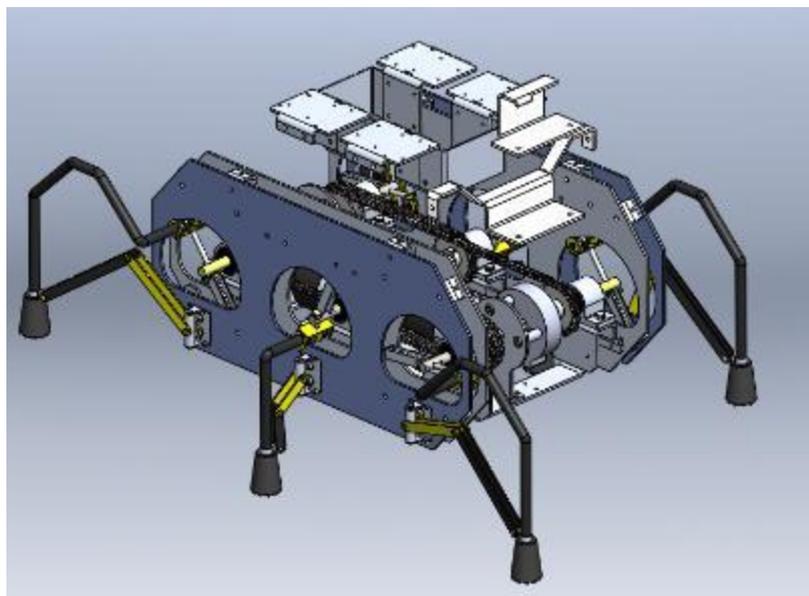


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.2.11 Etapa 11: Montagem dos Suportes Adicionais

Nesta etapa de montagem os suportes citados no tópico 4.1.13 da Figura 45 e da Figura 49 são inseridos no robô. Ao todo são montados dois suportes centrais (Figura 45) que sustentam às duas baterias e os componentes eletroeletrônicos, e o suporte da câmera filmadora é montado na parte frontal do Artrópode Mecânico. A Figura 67 mostra a vista explodida simulando a montagem destes componentes.

Figura 67 - Etapa de Montagem 11

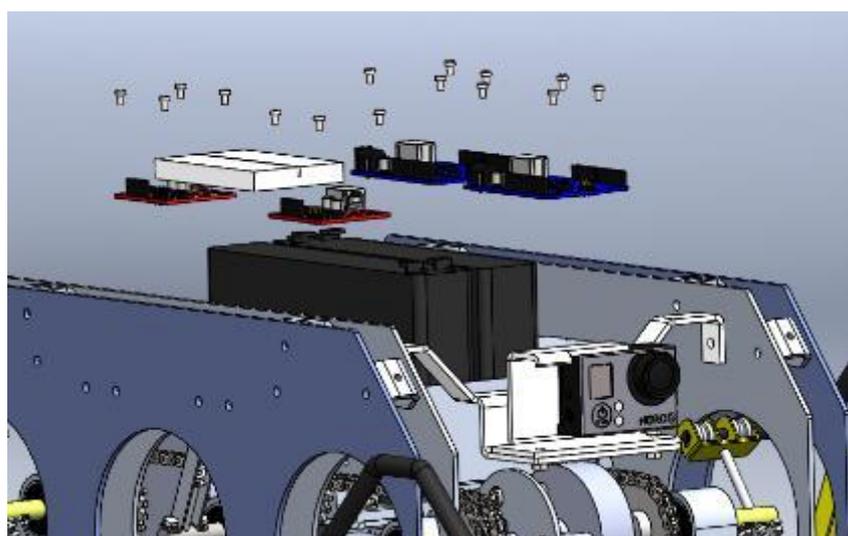


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.2.12 Etapa 12: Montagem dos Componentes Eletroeletrônicos

A Figura 68 mostra a etapa de montagem dos componentes eletroeletrônicos nos suportes.

Figura 68 – Etapa de Montagem 12

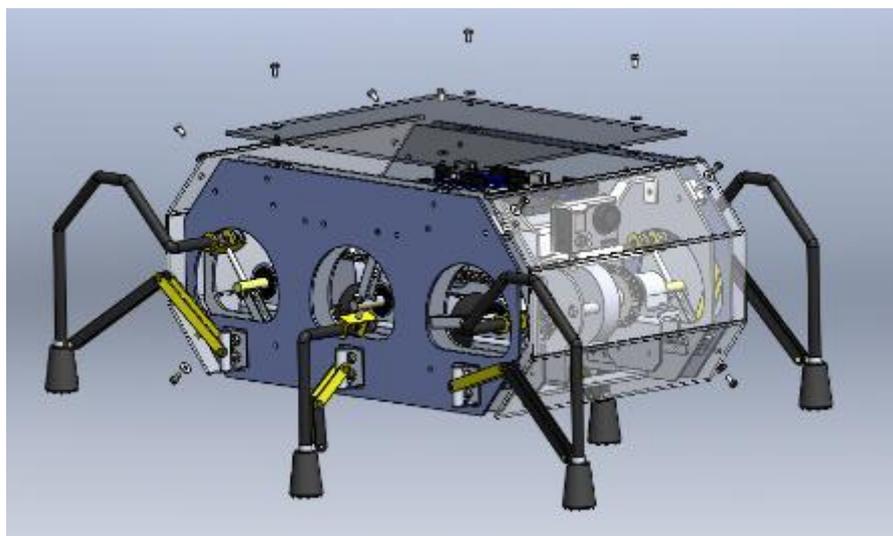


Fonte: Elaborado pelo Autor.

#### 4.2.13 Etapa 13: Montagem das Chapas de Fechamento

A fase final de montagem consiste na introdução das chapas de policarbonato que foram citados no tópico 4.1.14 (Figura 51 e Figura 52), a Figura 69 mostra a vista explodida mostrando a última etapa de montagem com a introdução das chapas de fechamento.

Figura 69 – Etapa de Montagem 13

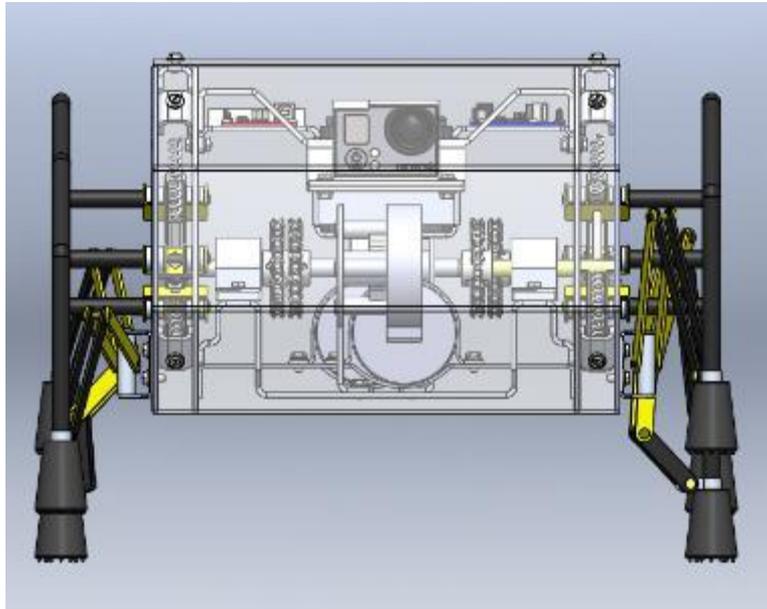


Fonte: Elaborado pelo Autor

### 4.3 Projeto Final

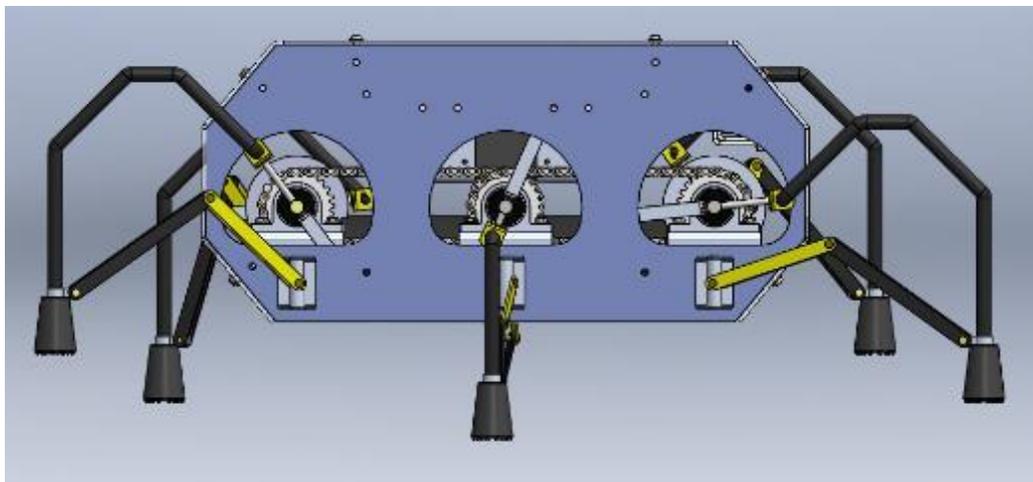
Mostrada as etapas de montagem, foi possível apresentar as imagens finalizadas do projeto assim como os dados. A Figura 70 mostra a vista frontal do robô, a Figura 71 a vista lateral esquerda, a Figura 72 a superior e a Figura 73 a isométrica. A Tabela 8 mostra os dados do projeto finalizados do Artrópode Mecânico, estes foram importantes para análises de cálculo e simulações.

Figura 70 – Vista Frontal



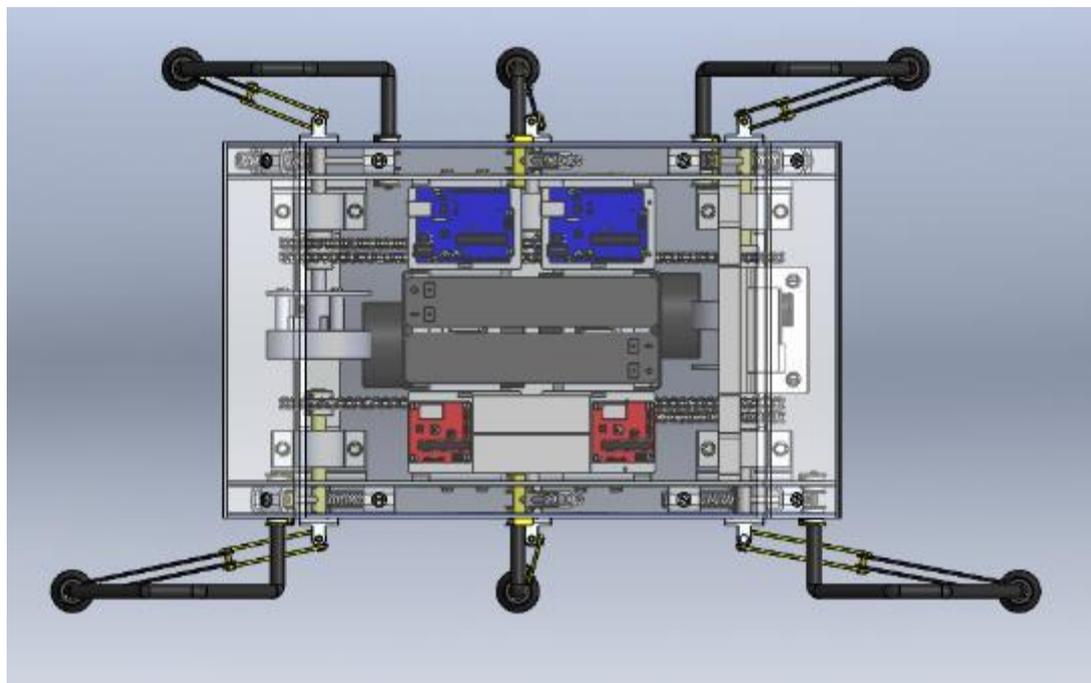
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 71 – Vista Lateral esquerda



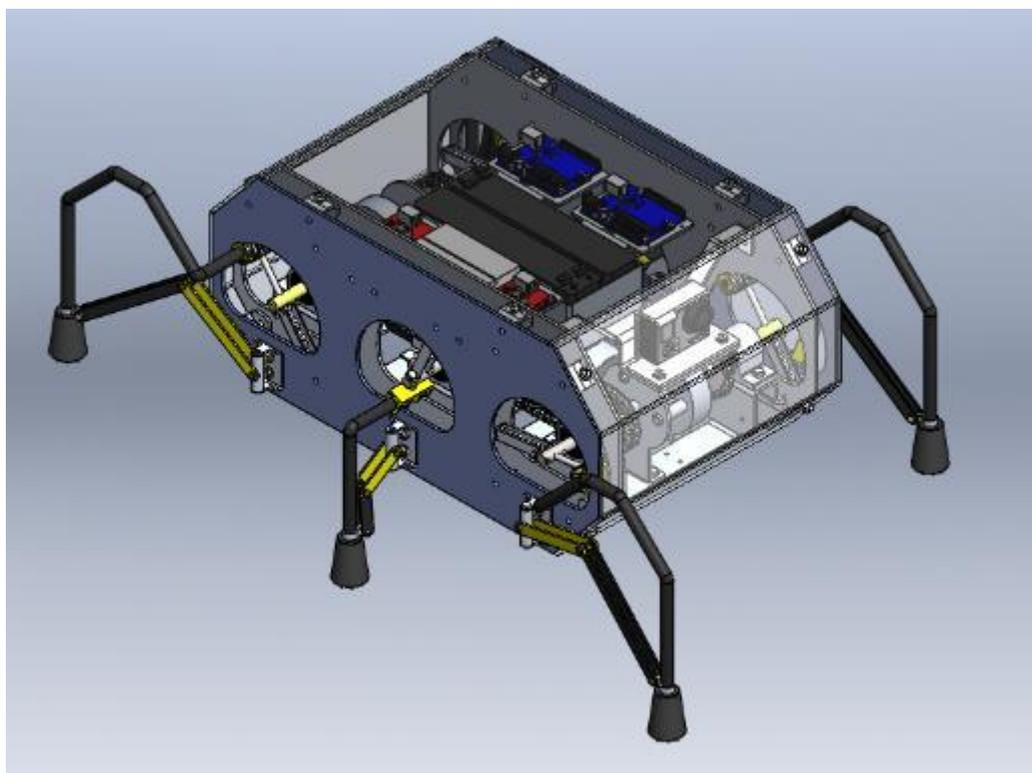
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 72 – Vista Superior



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 73 – Vista Isométrica



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 8 – Dados do Artrópode Mecânico

DADOS	VALOR	UNIDADE
Altura Total	287,15	mm
Distância do extremo de uma pata a outra	619,2	mm
Largura de uma pata a outra	400	mm
Altura do Corpo	203	mm
Comprimento do Corpo	267	mm
Massa total	11,33	kg
Massa total 2 (Utilizando a bateria 12V9Ah)	12,33	kg

Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.4 Cálculos de Desempenho

Com os dados fornecidos pelo fabricante do motor e os dados finais do projeto do robô, pode-se calcular o quanto de torque será necessário para o movimento inicial. Como os dados de potência do motor não são fornecidos, se calcula a potência para depois, com os dados das baterias, calcular o consumo de energia. E por fim, a velocidade que o robô pode atingir

Antes da formalização dos cálculos, é preciso analisar a distribuição do peso sobre as patas do Artrópode Mecânico. Sabendo que a massa do robô é de 11,33 quilogramas, pode-se determinar a força gravitacional ( $\vec{F}_g$ ) que puxa o mecanismo para baixo.

Então o peso em Newtons (N), conforme Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 100), do Artrópode mecânico é dado pela Equação (1).

$$P = F_g = mg \quad (1)$$

A incógnita “g” representa aceleração da gravidade ( $g=9,8 \text{ m/s}^2$ ). (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2013, p. 21). A incógnita “m” é a massa do robô (11,33 quilogramas). Com esses dados, o peso em Newtons do robô é determinado:

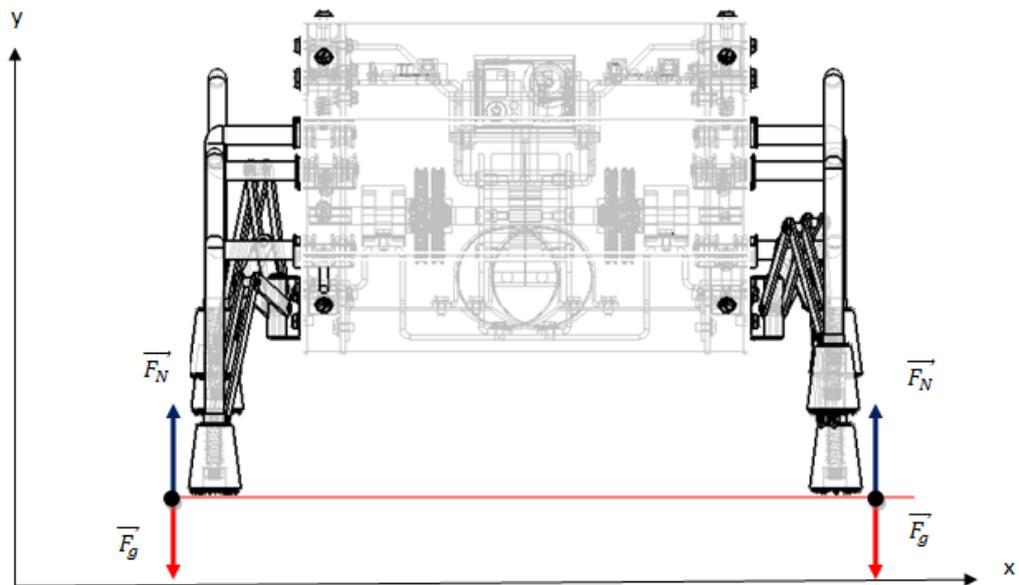
$$P = 11,28kg \times \frac{9,8m}{s^2} \left[ N \times \frac{s^2}{kg \cdot m} \right]$$

$$P \cong 111N$$

Sabendo que o Artrópode Mecânico foi projetado para ser sustentado por um par de patas ao solo durante o seu trajeto, o peso calculado é distribuído sobre as pernas do robô.

A Figura 74, mostra o robô sobre vista frontal com a apresentação das forças vetoriais sobre as patas.

Figura 74 – Diagrama das Forças Verticais Sobre as Patas do Robô.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observando a Figura 74, segundo Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 101), as forças gravitacionais  $\vec{F}_g$  e as forças normais  $\vec{F}_N$  são as que atuam sobre as patas na direção vertical. Assim, aplicação da segunda lei de Newton para análise destas forças verticais, considerando o referencial positivo para cima, é dada pela equação (2). (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2013).

$$F_N - F_g = ma_y \quad (2)$$

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 101), se as patas não estão aceleradas em relação ao solo, então  $a_y = 0$ , e substituindo  $F_g$  por  $mg$  equação (1) temos que a força normal é dada pela equação (3):

$$F_N = mg \quad (3)$$

Com a equação 3, se determina as forças normais atuando em cada pata do robô.

$$F_N = \frac{111N}{2}$$

$$F_N = 55,5N$$

Essa força determinada de 55,5 Newtons é ponto de partida para os restantes dos cálculos, como o torque para a movimentação, velocidade do robô, e análise de resistência dos componentes críticos.

Sabendo que o robô pode armazenar outro modelo de bateria para energizar os dois motores, a massa do mecanismo aumenta, portando, utilizando a equação (3) para o cálculo da força para a segunda condição terá:

$$F_N = \frac{120,8N}{2}$$

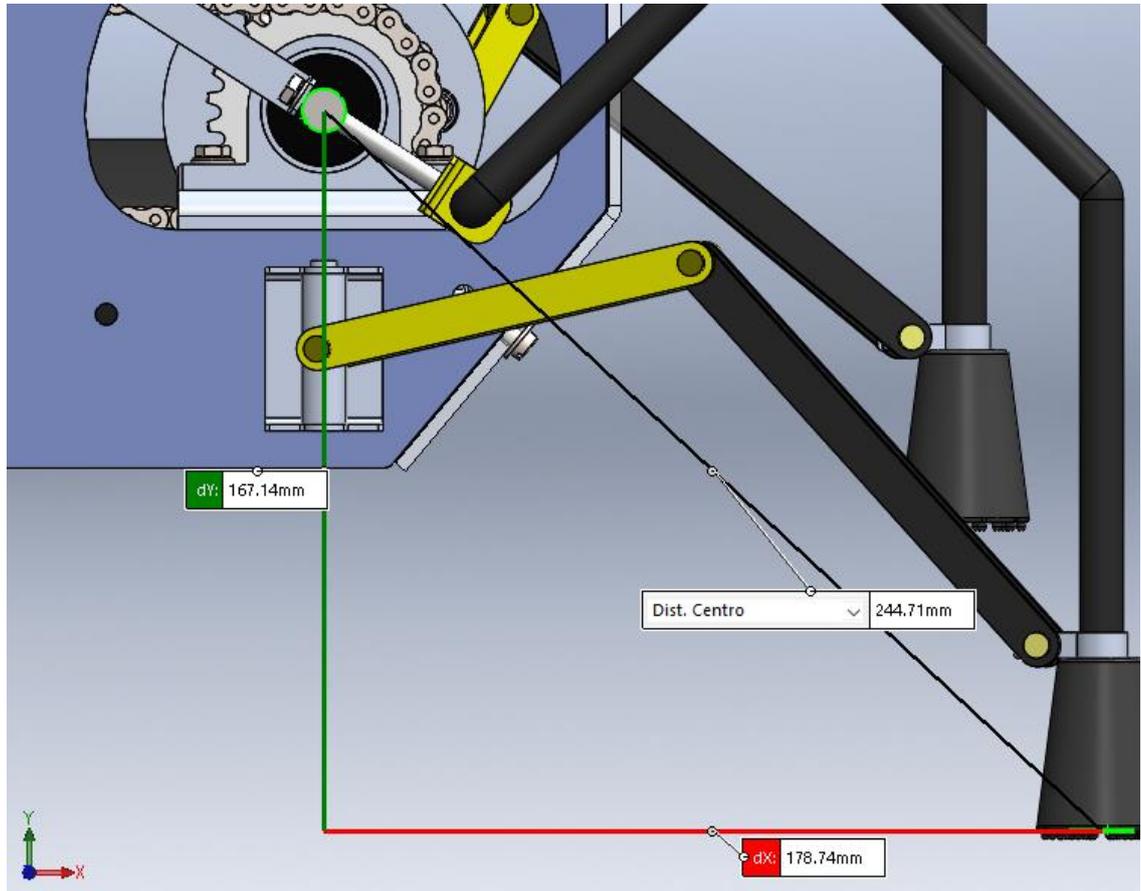
$$F_N = 60,4N$$

#### 4.4.1 Cálculo do Torque

Calcular o quanto de torque é necessário para a movimentação do robô é importante para saber se o motor selecionado no tópico 4.1.2 atende esse parâmetro exigido para o projeto. Para isso, foi analisado em que ponto a pata dianteira estaria mais distante do eixo do motor. Com o recurso de medição do *software Solidworks*, a Figura 75 mostra a medição deste ponto destacado por um triângulo retângulo. A linha destacada de preto mostra a hipotenusa, sendo a distância do centro da pata do robô até o centro do eixo, indicando um valor medido de 244,71 milímetros, essa é distância utilizada para o cálculo do torque. A abscissa indicada de vermelho mostra um valor de 178,74 milímetros e a ordenada indicada de verde mostra um valor medido de 167,14 milímetros. Essas cotas restantes embora não façam parte do cálculo do torque, elas são importantes para a determinação dos ângulos para descobrir, através das análises de forças vetoriais, a força resultante na determinação do torque.

Analisando o triângulo mostrado na Figura 75, a abscissa e a ordenada formam um ângulo de noventa graus e os outros ângulos devem ser determinados para medir o ângulo da força resultante responsável pelo torque.

Figura 75 – Ponto de Distância Maior da Pata Dianteira



Fonte: Elaborado pelo Autor

O triângulo retângulo medido na Figura 75, é representado, para ter melhor compreensão do movimento da pata na análise do cálculo do torque, na Figura 76. Nela se observa que o ponto B representa o centro do eixo do motor, C indica o ponto em que a pata está sobre o solo e A representa o ponto de noventa graus do triângulo. As linhas representadas pôr a, b e c são as cotas medidas, mostradas na Figura 75. Os ângulos beta e alfa, foram determinados a partir das equações trigonométricas das equações (4) e (5):

$$\cos^{-1}(\beta) = \frac{b}{c} \quad (4)$$

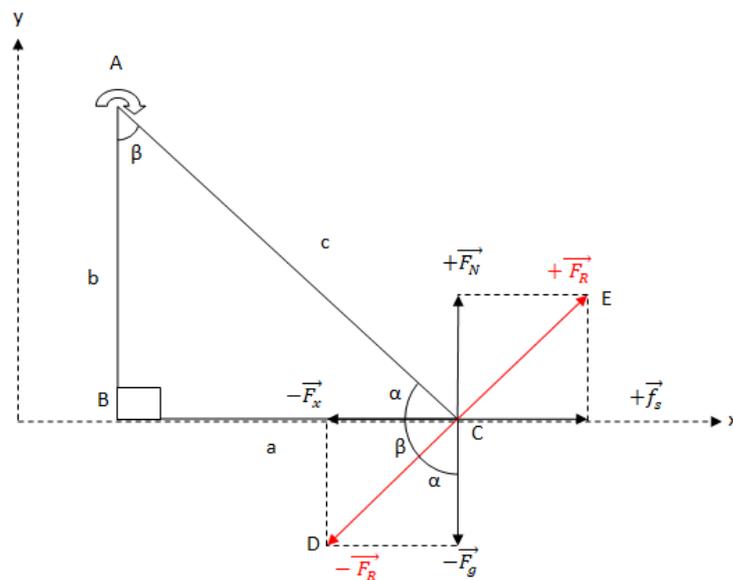
$$\cos^{-1}(\alpha) = \frac{a}{c} \quad (5)$$

Substituindo os valores de a, b e c nas equações (4) e (5), se obtêm os ângulos beta e alfa:

$$\cos^{-1}(\beta) = \frac{167,14\text{mm}}{244,71\text{mm}} = 46,92^\circ$$

$$\cos^{-1}(\alpha) = \frac{178,74\text{mm}}{244,71\text{mm}} = 43,08^\circ$$

Figura 76 – Ângulos e Forças Vetoriais



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observando ainda a Figura 76, no ponto A, que indica o centro de rotação do eixo, a seta circular indica o giro do eixo do motor no sentido horário fazendo com que a pata quando toca na superfície no ponto C, tenha a tendência de deslizar para o sentido esquerdo no eixo x. Entretanto, para que o robô se movimente para frente (sentido para direita no eixo x) a pata deve se manter fixa na superfície, visto que, como descrito no tópico 3.1.1, o movimento do robô é gerado pela força do motor.

Analisando a decomposição das forças no ponto C, no eixo y as forças  $\vec{F}_N$  e  $\vec{F}_g$  tem a mesma direção em sentidos opostos, e como calculado anteriormente, ambos têm mesmo módulo de 55,5 Newtons. No eixo x, a força  $\vec{F}_x$  é gerada pela força de giro do eixo do motor, e a força  $\vec{f}_s$  é de atrito estático.

De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 124) quando um corpo não se move, a força de atrito estático  $\vec{f}_s$  e outra força  $\vec{F}_x$  paralela a uma superfície se equilibram. Essas forças têm a mesma direção, mas sentidos diferentes. O módulo da força de atrito estático  $\vec{f}_s$  possui um valor máximo  $\vec{f}_{s,máx}$  dado pela equação (6):

$$\vec{f}_{s,máx} = \mu_s \cdot F_N \quad (6)$$

Onde  $\mu_s$ , é o coeficiente de atrito estático, cujo é um número adimensional que são determinados experimentalmente de acordo com os materiais que são feitos os objetos e as superfícies. (KNIGHT, 2009, p. 163).

A Tabela 9 mostra alguns valores típicos de coeficientes de atrito. É importante enfatizar que esses números são apenas aproximações e que os valores exatos dependem de fatores como rugosidade, limpeza e grau de secura das superfícies de contato. (KNIGHT, 2009, p. 163).

Tabela 9 – Coeficientes de Atrito

<b>Material</b>	<b>Estático <math>\mu_s</math></b>	<b>Cinético <math>\mu_k</math></b>	<b>Rolamento <math>\mu_r</math></b>
Borracha sobre concreto	1,00	0,80	0,02
Aço sobre Aço (a seco)	0,80	0,60	0,002
Aço sobre Aço (com lubrificação)	0,10	0,05	
Madeira sobre Madeira	0,50	0,20	
Madeira sobre Neve	0,12	0,06	
Gelo sobre Gelo	0,10	0,03	

Fonte: Knight (2009, p. 163)

As patas do Artrópode Mecânico foram projetadas com material de borracha Neoprene, sendo assim, conforme a Tabela 9, considerando para análise do cálculo de material de borracha sobre concreto, para determinar a força de atrito estático, o coeficiente de atrito estático  $\mu_s$  considerado foi de valor igual a 1,00. Por conseguinte, conforme a equação (6) módulo da força de atrito estático é calculado:

$$|\vec{f}_{s,máx}| = 1,00 \times 55,5N ;$$

$$|\vec{f}_{s,máx}| = 55,5N$$

Como observado na Figura 76, as forças  $\vec{F}_x$  e  $\vec{f}_s$  tem mesma direção e sentidos opostos, então:

$$|\vec{f}_{s,máx}| = |\vec{F}_x|$$

$$|\vec{F}_x| = 55,5N$$

Observando ainda a Figura 76, a força resultante  $\vec{F}_R$  é a soma vetorial das forças  $\vec{F}_x$  e  $\vec{F}_g$ . Conforme Winterle (2000, p. 8), um vetor resultante pode ser traçado em uma diagonal em um paralelogramo formado das extremidades dos vetores de mesma origem, e isso pode ser observado com os vetores  $\vec{F}_R$  originados no ponto C com extremidades nos pontos D e E. Através desta análise, o cálculo da força resultante  $\vec{F}_R$  pode ser determinado conforme as equações (7), (8), (9) e (10):

$$|\vec{F}_R| = \vec{F}_x \cdot \text{Sen}(\alpha) \quad (7)$$

$$|\vec{F}_R| = \vec{F}_x \cdot \text{Cos}(\beta) \quad (8)$$

$$|\vec{F}_R| = \vec{F}_g \cdot \text{Sen}(\beta) \quad (9)$$

$$|\vec{F}_R| = \vec{F}_g \cdot \text{Cos}(\alpha) \quad (10)$$

Substituindo os valores na equação (7), tem-se:

$$|\vec{F}_R| = 55,5 N \times \text{Sen}(43,08)$$

$$|\vec{F}_R| = 37,92 N$$

Sabendo que a grandeza torque é o produto de uma distância  $r$  por uma componente de força  $F_t$  que é perpendicular à direção radial, determinado pela equação (11). (KNIGHT, 2009, p. 352).

$$\tau = r \cdot F_t \quad (11)$$

No caso deste estudo,  $r$  é a componente c da Figura 76, e  $F_t$  é a força resultante  $\vec{F}_R$  que substituindo na equação (11) se obtém:

$$\tau = 244,71mm \cdot 37,92N \cdot \left[ \frac{m}{1000mm} \right]$$

$$\tau = 9,3Nm$$

Esse torque calculado determina o mínimo que o motor selecionado deve ter de torque para poder movimentar o robô na primeira condição.

Para a segunda condição substituindo os valores na equação (7), tem-se:

$$|\vec{F}_R| = 60,4 N \times \text{Sen}(43,08)$$

$$|\vec{F}_R| = 41,26 N$$

Substituindo esse valor de força resultante na equação (11), pode ser determinado o torque necessário para a movimentação no robô para a segunda condição:

$$\tau = 244,71mm \cdot 41,26N \cdot \left[ \frac{m}{1000mm} \right]$$

$$\tau = 10,10Nm$$

#### 4.4.2 Cálculo da Potência Requerida do Motor

Com os dados do motor na Tabela 3, pode-se calcular a potência requerida deste motor para posteriormente calcular o consumo de bateria e a velocidade do Artrópode Mecânico.

De acordo Halliday, Resnick e Walker (2013, p. 271), a potência P pode ser calculada através da equação (12):

$$P = \tau_N \cdot \omega \quad (12)$$

Para o cálculo da potência, primeiro deve-se converter a unidade da velocidade angular para radianos por segundo:

$$\omega = \frac{20rot}{min} \times \frac{min}{60s} \times \frac{2\pi rad}{rot}$$

$$\omega = 2,094 \frac{rad}{s}$$

Com o valor da velocidade angular calculada em radianos por segundo, e utilizando os dois valores dos torques calculados no tópico 4.4.1, temos as potências requeridas P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub> do motor para às duas condições substituindo os valores na equação (12):

$$P_1 = 9,3Nm \times 2,094 \frac{rad}{s} \left[ \frac{J}{Nm} \right] \times \left[ \frac{Ws}{J} \right]$$

$$P_1 = 19,4 W$$

$$P_2 = 10,1Nm \times 2,094 \frac{rad}{s} \left[ \frac{J}{Nm} \right] \times \left[ \frac{Ws}{J} \right]$$

$$P_2 = 21,2 W$$

#### 4.4.3 Cálculo do Consumo da Bateria

As baterias estudadas no projeto foram de dois modelos. Um dos modelos é para utilização de duas baterias para energizar os motores individualmente. O outro é para utilização de uma bateria para energizar os dois motores simultaneamente.

A Figura 77 mostra a imagem da bateria 1 modelo UP1223 e a Tabela 10 mostra sua especificação técnica. A Figura 78 mostra a imagem da bateria 2 modelo UP1290 e a Tabela 11 mostra suas especificações técnicas.

Figura 77 – Bateria 1 Modelo UP1223



Fonte: Unipower (2020)

Tabela 10 – Especificações Técnicas da Bateria UP1223

Dados	Medidas	Unidade
Carga	2,3	Ah
Tensão Nominal	12,0	V
Capacidade (C10)	2,1	A
Capacidade (C20)	2,3	A
Comprimento	179,0	mm
Largura	35,0	mm
Altura Total	66,0	mm
Peso	0,7	kg

Fonte: Unipower (2020)

Figura 78 – Bateria 2 Modelo UP1290



Fonte: Unipower (2020)

Tabela 11 – Especificações Técnicas da Bateria UP1290

Dados	Medidas	Unidade
Carga	9Ah	Ah
Tensão Nominal	12,0	V
Capacidade (C10)	8,3	A
Capacidade (C20)	9,0	A
Comprimento	151,0	mm
Largura	65,0	mm
Altura Total	100,0	mm
Peso	2,6	kg

Fonte: Unipower (2020)

Conforme a lei da conservação de energia, a redução de energia potencial elétrica no percurso de um circuito de uma bateria deve ser acompanhada em uma conversão de energia para outra forma qualquer e que uma potência  $P$  associada a essa conversão é a taxa de transferência de energia dada pela equação (13), que no caso de um motor acoplado a uma carga mecânica, essa energia se transforma em trabalho (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2009).

$$P = iV \quad (13)$$

Onde:

$P$  = Potência em Watts (W)

$i$  = Corrente em Ampere (A)

$V$  = Tensão em Volts (V)

Com a potência requerida calculada no tópico 4.4.2, e com o valor da tensão do motor com os dados da Tabela 3, se determina o consumo de corrente que motor utiliza das baterias na primeira condição substituindo os valores na equação (13):

$$i = \frac{P}{V} = \frac{19,4W}{12V} \left[ \frac{J}{Ws} \right] \times \left[ \frac{VC}{J} \right] \left[ \frac{As}{C} \right]$$

$$i = 1,619A$$

Para a segunda condição, sabendo que a bateria energiza os dois motores, temos:

$$i = \frac{P}{V} = \frac{21,2W \times 2}{12V} \left[ \frac{J}{Ws} \right] \times \left[ \frac{VC}{J} \right] \left[ \frac{As}{C} \right]$$

$$i = 3,528A$$

Com a especificação da carga da bateria 1 (UP1223) na Tabela 10, pode-se de determinar a duração de tempo utilização desta bateria:

$$T_1 = \frac{2,3Ah}{1,619 A}$$

$$T_1 = 1,42h$$

Com a especificação da carga da bateria 2 (UP1290) na Tabela 11, pode-se de determinar a duração de tempo utilização desta bateria:

$$T_2 = \frac{9Ah}{3,258A}$$

$$T_2 = 2,55h$$

#### 4.4.4 Cálculo da Velocidade

A velocidade linear é sempre tangente a uma trajetória circular situado a uma distância de um eixo de rotação, expressa pela equação (14). (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2013).

$$v = \omega r \tag{14}$$

Onde:

$\omega$  = Velocidade Angular.

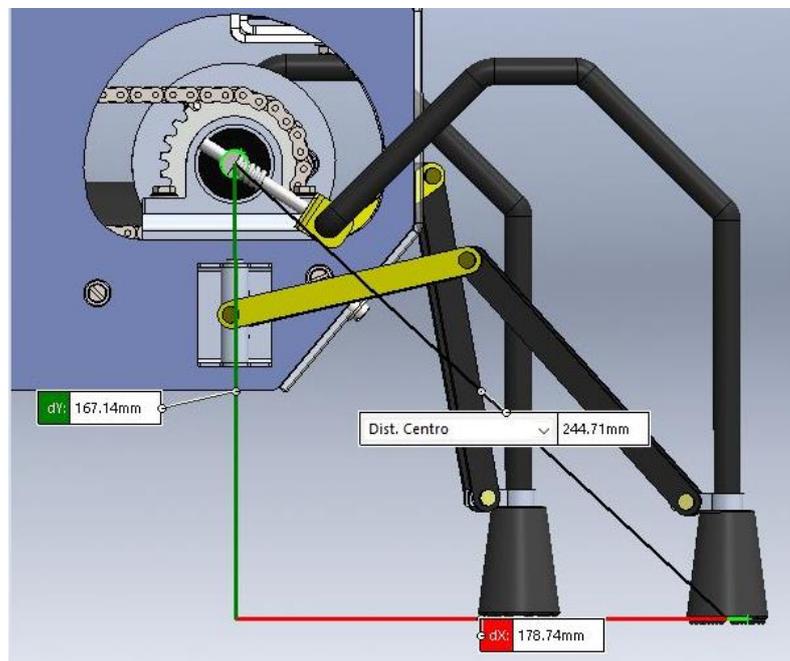
$r$  = Raio de distância do centro do eixo.

Conforme a equação (14), a velocidade angular é constante, e quanto mais o raio é distante do centro do eixo maior é a velocidade linear, e se a velocidade angular é constante, a velocidade linear a uma distância de raio também é constante. (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2013).

Porém, para determinar a velocidade linear média do Artrópode Mecânico, é preciso analisar a trajetória do seguidor que conduz a perna na aresta linear da came, sendo nesta trajetória que a pata do robô se mantém na superfície, e o raio medido no centro da pata até o centro do eixo do motor se altera durante este percurso.

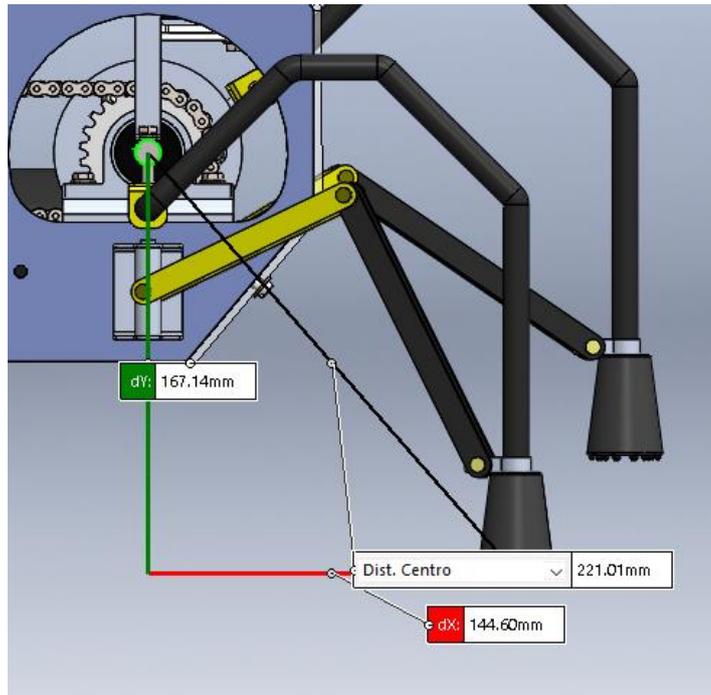
A Figura 79 mostra, utilizando o recurso de medição do *Solidworks*, o raio medido no início do percurso do seguidor de 244,71 milímetros. A Figura 80 mostra o raio na metade do percurso com a medida de 221,01 milímetros. E por fim, a Figura 81 mostra a medida no fim do percurso na aresta linear com a medida de 200,35 milímetros.

Figura 79 – Raio no Início da Trajetória do Seguidor com a Pata ao Solo na Aresta Linear da Came



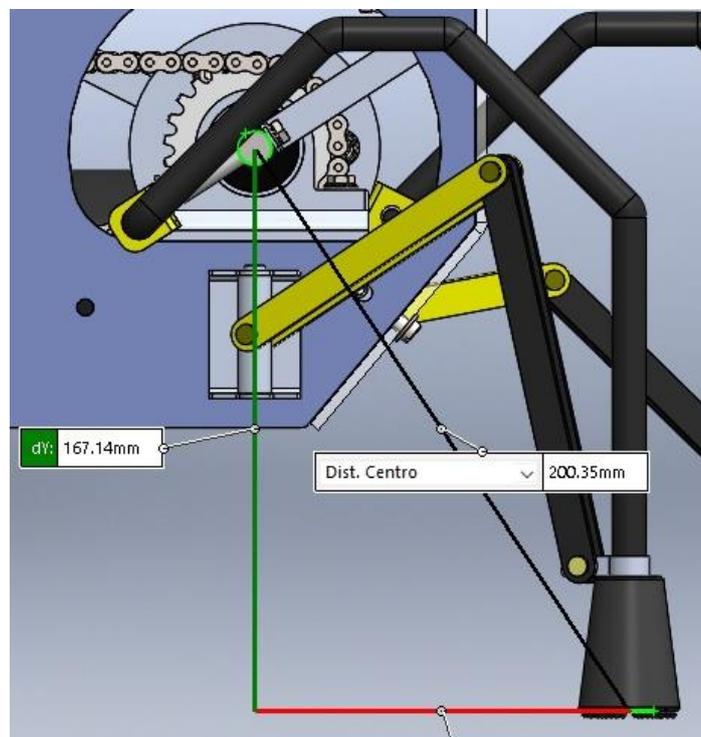
Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 80 – Raio na Metade do Percurso do Seguidor na Aresta Linear da Came



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 81 – Raio no Fim do Percurso do Seguidor na Aresta Linear da Came

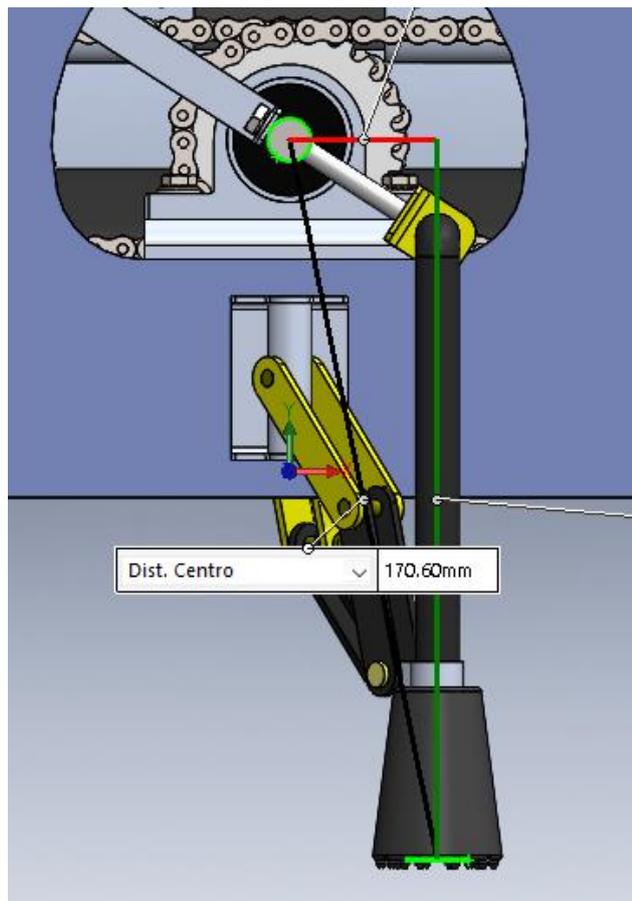


Fonte: Elaborado pelo Autor

Nas pernas centrais, como a geometria das pernas diferem das traseiras e das dianteiras, a variação do raio durante o trajeto do robô no percurso do seguidor na

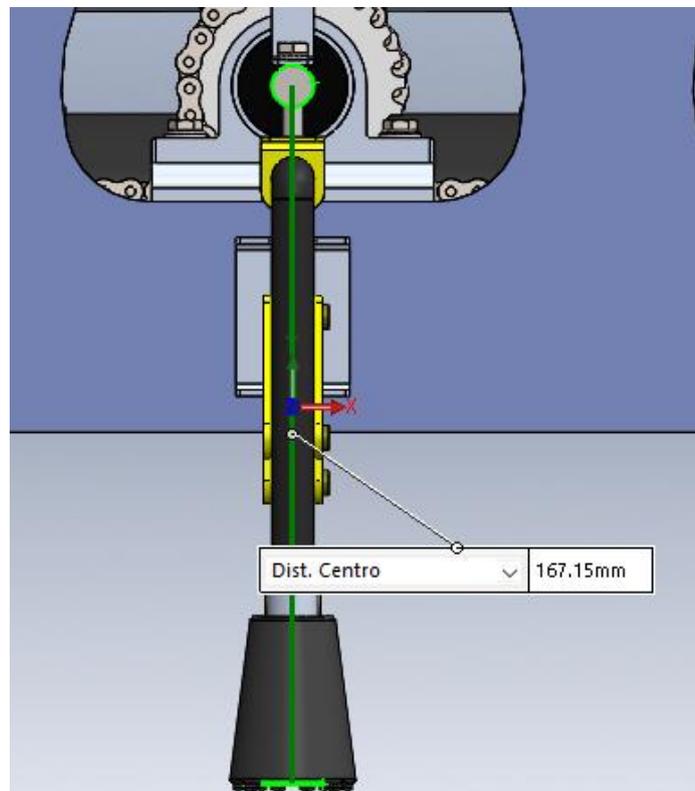
came central é diferente. A Figura 82 mostra a medição do raio no início do percurso do seguidor na aresta linear da came central com o valor de 170,6 milímetros, a Figura 83 mostra na metade do percurso com o valor de 167,15 milímetros e a Figura 84 mostra no fim do percurso com o mesmo valor do início de 170,6 milímetros.

Figura 82 - Raio no Início da Trajetória do Seguidor na Aresta Linear da Came Central



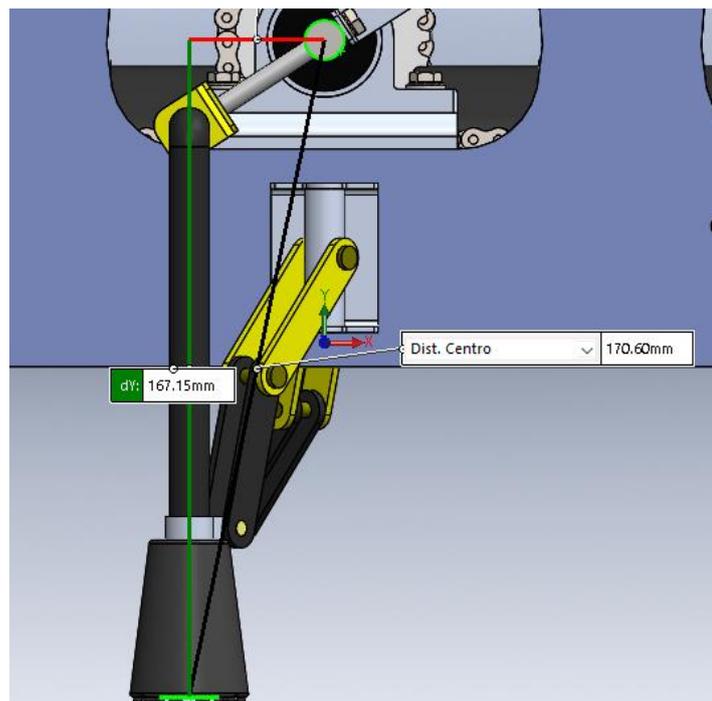
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 83 - Raio na Metade da Trajetória do Seguidor na Aresta Linear da Came Central



Fonte: Elaborado pelo Autor

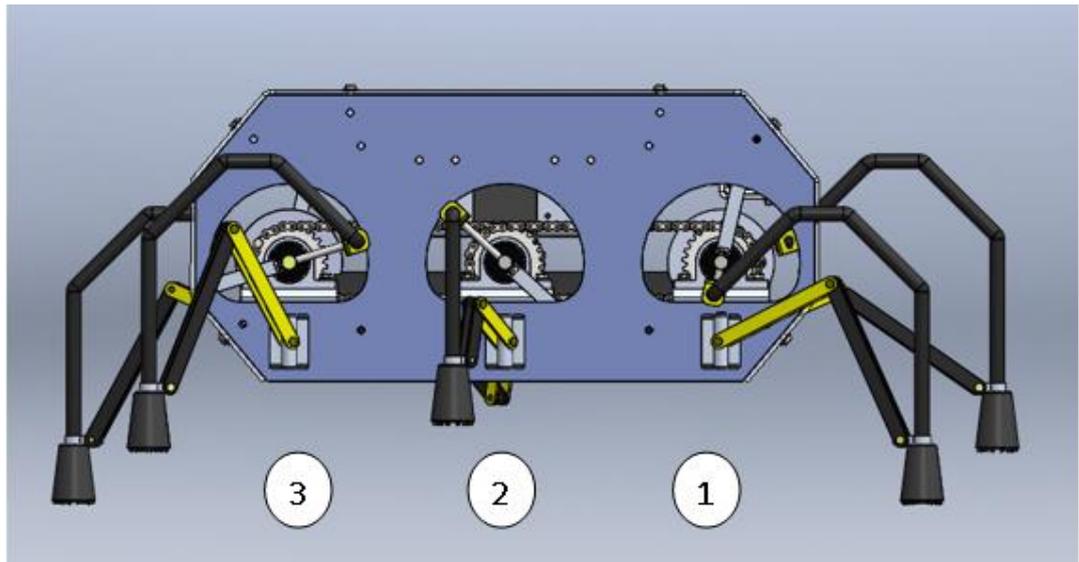
Figura 84 - Raio no Fim da Trajetória do Seguidor na Aresta Linear da Came Central



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 85 mostra a vista lateral esquerda com as cames numeradas para facilitar a compreensão do cálculo das velocidades. Observando a Figura 85, a came número um é a que movimenta a perna dianteira esquerda, a número dois movimenta a perna central e a número três movimenta a traseira.

Figura 85 – Vista Lateral Esquerda com as Cames Numeradas



Fonte: Elaborado pelo Autor

Com o valor da velocidade angular do motor de 2,094 radianos por segundo, e utilizando a equação (14), as velocidades lineares foram calculadas para cada raio medido nas cames, para depois calcular a velocidade linear média em cada came. A Tabela 12 mostra os valores calculados na came um, a Tabela 13 para came dois e a Tabela 14 para a came três;

Tabela 12 – Cálculo das Velocidades da Came 1

Raio	Medida	Unidade	Velocidade Linear	Unidade
1	0,245	m	0,513	m/s
2	0,221	m	0,463	m/s
3	0,200	m	0,420	m/s
<b>Velocidade Linear Média Came 1</b>			0,465	m/s

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 13 - Cálculo das Velocidades da Came 2

Raio	Medida	Unidade	Velocidade Linear	Unidade
1	0,171	m	0,357	m/s
2	0,167	m	0,350	m/s
3	0,171	m	0,357	m/s
<b>Velocidade Linear Média Came 2</b>			0,355	m/s

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 14 - Cálculo das Velocidades da Came 3

Raio	Medida	Unidade	Velocidade Linear	Unidade
1	0,245	m	0,513	m/s
2	0,221	m	0,463	m/s
3	0,200	m	0,420	m/s
<b>Velocidade Linear Média Came 3</b>			0,465	m/s

Fonte: Elaborado pelo Autor

Com os valores apresentados, pode-se estimar que a velocidade média que o Artrópode Mecânico irá atingir é de:

$$v_m = \frac{(0,465 + 0,355 + 0,465) \text{ m}}{3 \text{ s}}$$

$$v_m = 0,428 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

#### 4.5 Simulação de Elementos Finitos

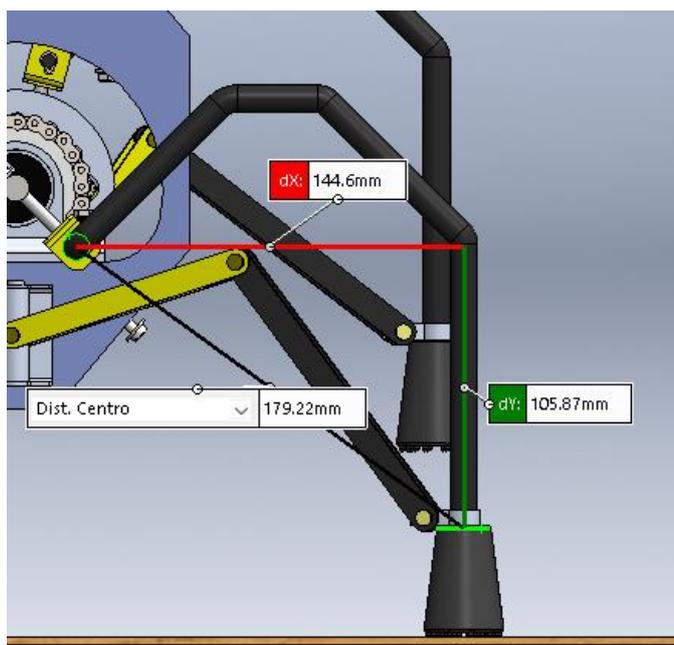
Os componentes do projeto considerados mais críticos, são as pernas e os eixos que movimentam o mecanismo. Para as análises de resistência das pernas foi considerada a carga mais crítica, ou seja, calculada para a segunda condição de projeto de 60,4 N.

##### 4.5.1 Resistência à Flexão das Pernas Maiores.

A Figura 86 mostra a simulação do momento que a pata do robô toca uma superfície. Nela pode ser observada, através do recurso de medição do *Solidworks*, as distâncias medidas do ponto de aplicação da carga ao elemento de apoio da perna

(seguidor). Seguindo as características dos veículos *off-road*, descrito no tópico 2.1, foi projetado molas montadas na parte interna da pata (Figura 62) com a finalidade de absorver o impacto do solo sobre as pernas. Porém, é necessário avaliar a carga gerada pela força normal do solo sobre as pernas.

Figura 86 – Simulação de Apoio da Pata

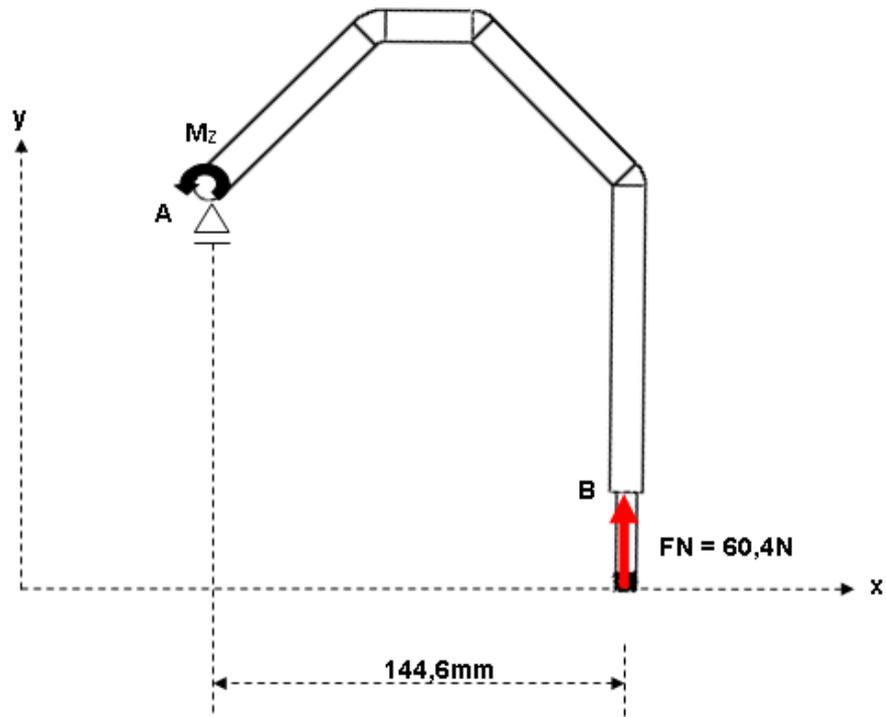


Fonte: Elaborado pelo Autor

Observando a Figura 86, a perna não interage com o solo, ou seja, a pata é que faz a interação, então para essa análise de carregamento de forças, diferente da análise do cálculo do torque, a carga a atuar sobre a perna é força normal calculada no tópico 4.4 através da equação (3).

A Figura 87 mostra a análise do carregamento para a simulação da resistência da perna. O ponto A é o elemento de apoio, ou seja, onde a perna é acoplada no rolamento do seguidor, o ponto B é onde ocorre a força normal que empurra a perna para cima. A força normal é gerada a uma distância de 144,6 milímetros do ponto A, fazendo com que ocorra um momento fletor  $M_z$  na perna. Com análise da interação da força com a perna, se conclui que a perna está submetida à flexão.

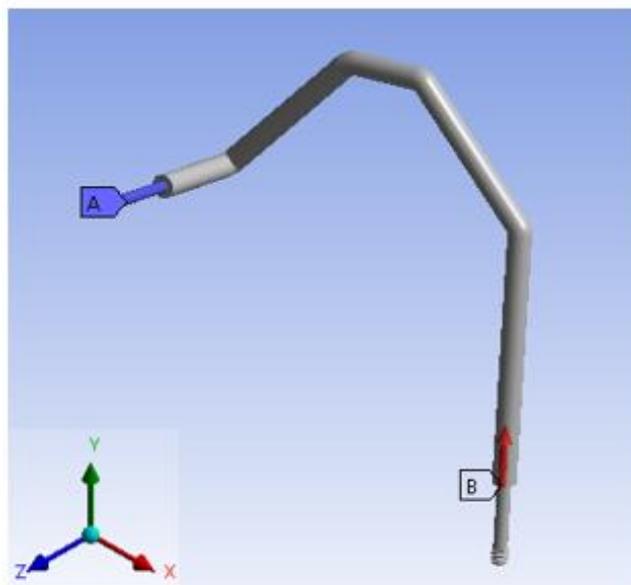
Figura 87 – Análise de Carregamento para o Cálculo da Perna



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 88 mostra a perna em três dimensões evidenciando a aplicação da carga no ponto B e a geométrica fixa no ponto.

Figura 88 – Face de Aplicação da Carga

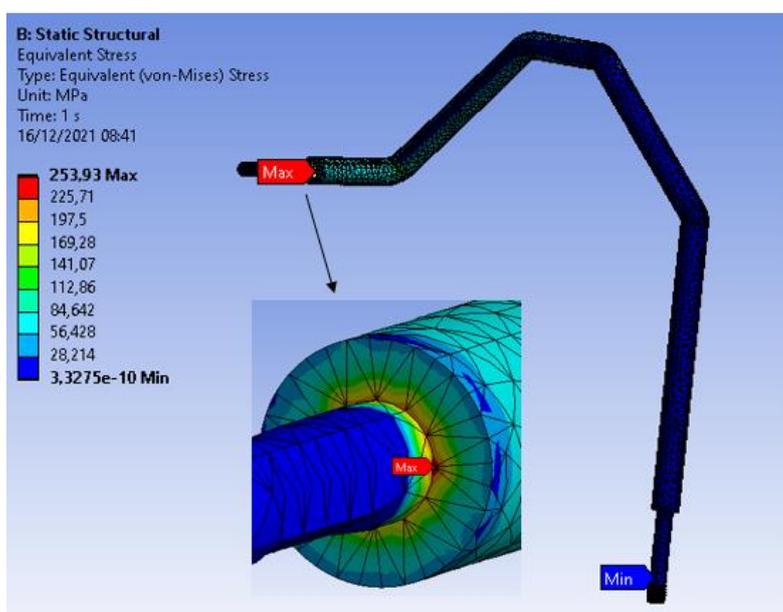


Fonte: Elaborado pelo Autor

Utilizando o *software* de simulação numérica *Ansys Mechanical*, considerando que o material é AISI/SAE 1020, foi realizada uma simulação por elementos finitos para avaliar o comportamento da perna sobre a força de 60,4 N, para obter uma estimativa de sua tensão máxima equivalente.

A Figura 89 mostra o resultado da simulação numérica para a tensão máxima equivalente de Von Mises, cujo valor apresentado foi de 253,93 MPa.

Figura 89 – Análise Elementos Finitos para Tensão Máxima



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observando a Figura 89, é possível visualizar a seta indicado em vermelho, que indica o ponto que vai ocorrer a tensão máxima equivalente.

Essa simulação mostrou o comportamento do material submetida ao um carregamento estático. Porém, sabendo que o robô exerce movimentos com essa perna, esse carregamento é repetido, pois, varia entre zero (perna levantada) até o máximo (perna em contato com o solo).

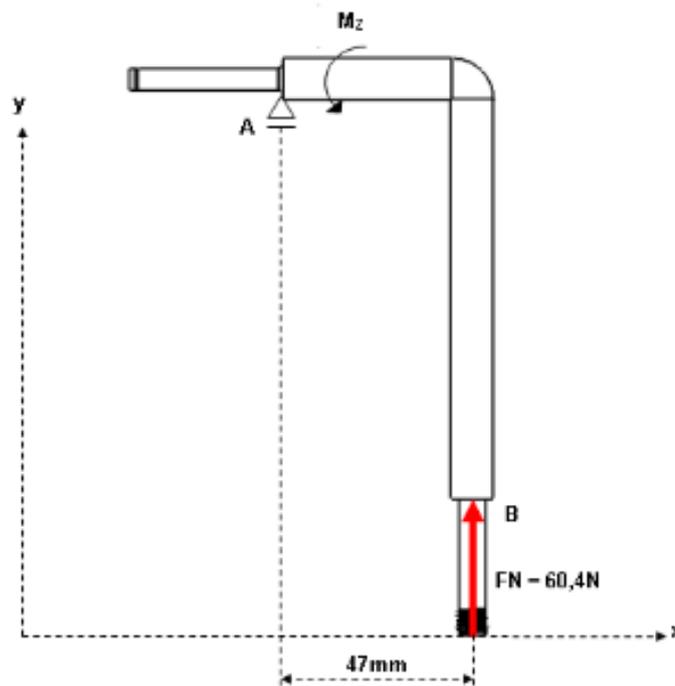
“Qualquer carga que varie no tempo pode, potencialmente, provocar uma falha devido à fadiga”. (NORTON, 2013, p. 313).

O carregamento de 60,4 newtons sobre a perna é repetido, ou seja, varia conforme o seguidor percorre a aresta da came, portanto, a perna estará sujeita a fadiga de baixo ciclo.

#### 4.5.2 Resistência à Flexão da Perna Central

A análise de resistência da perna central seguiu os mesmos critérios da perna maior. Porém, as pernas centrais têm geometria diferente das pernas maiores. A Figura 90 analisa o carregamento da perna mediana.

Figura 90 – Análise do Carregamento na Perna Mediana

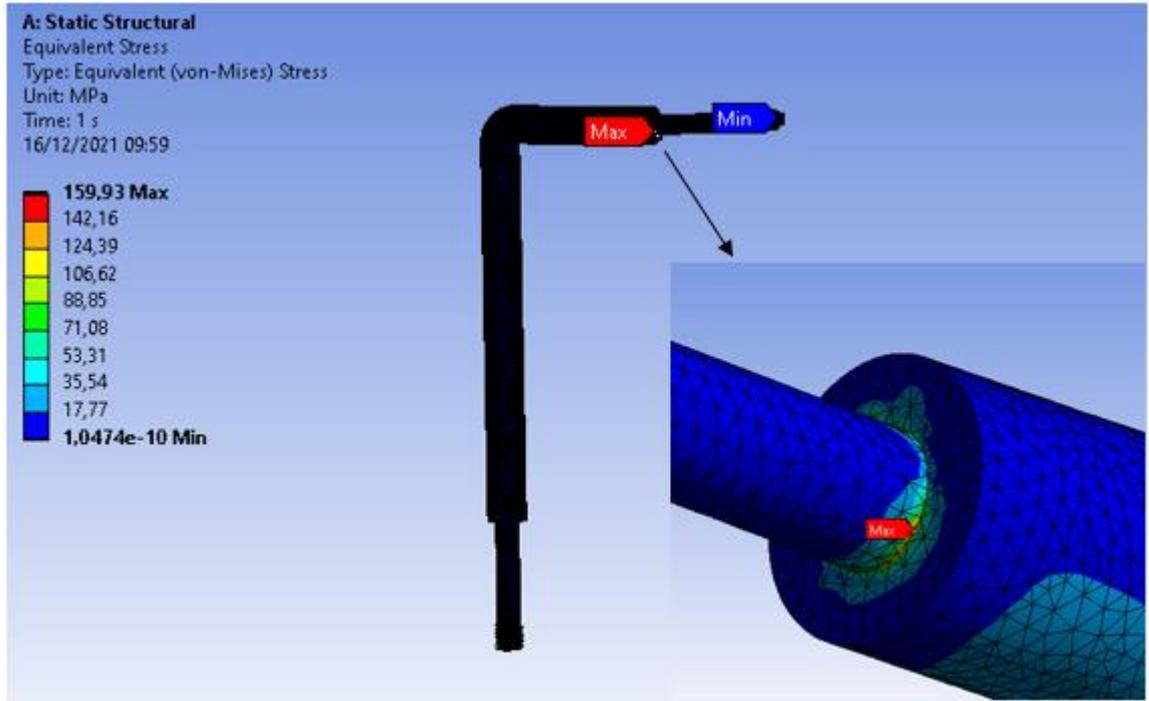


Fonte: Elaborado pelo Autor

Assim como na perna maior, observando a Figura 90, o único esforço que a perna mediana sofre quando apoia ao solo é flexão.

Para verificar seu comportamento sobre a carga de 60,4 N quando o robô toca o solo, foi feita análise de simulação numérica no *software Ansys*, para obter uma estimativa da tensão máxima equivalente. A Figura 91 mostra o resultado da simulação para carga estática, apresentando o valor máximo de tensão equivalente de 159,93 MPa.

Figura 91 – Análise de Elementos Finitos para Tensão Máxima Equivalente para a Perna Mediana

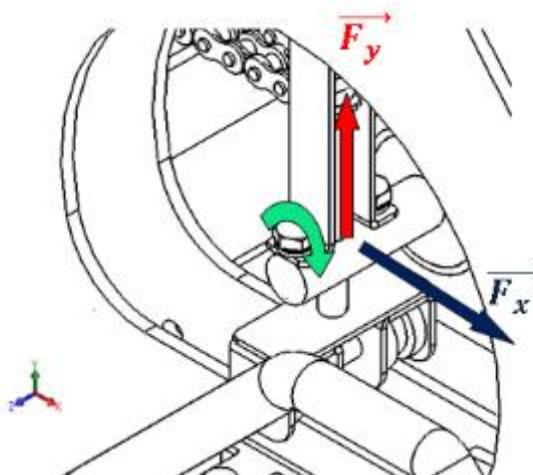


Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.5.3 Resistência à Torção e Flexão do Eixo

A Figura 92 mostra a sollicitação de torção e flexão que o eixo, que movimentava o mecanismo, está submetido quando aplicado o torque do motor.

Figura 92 – Análise das Forças aplicadas sobre Eixo



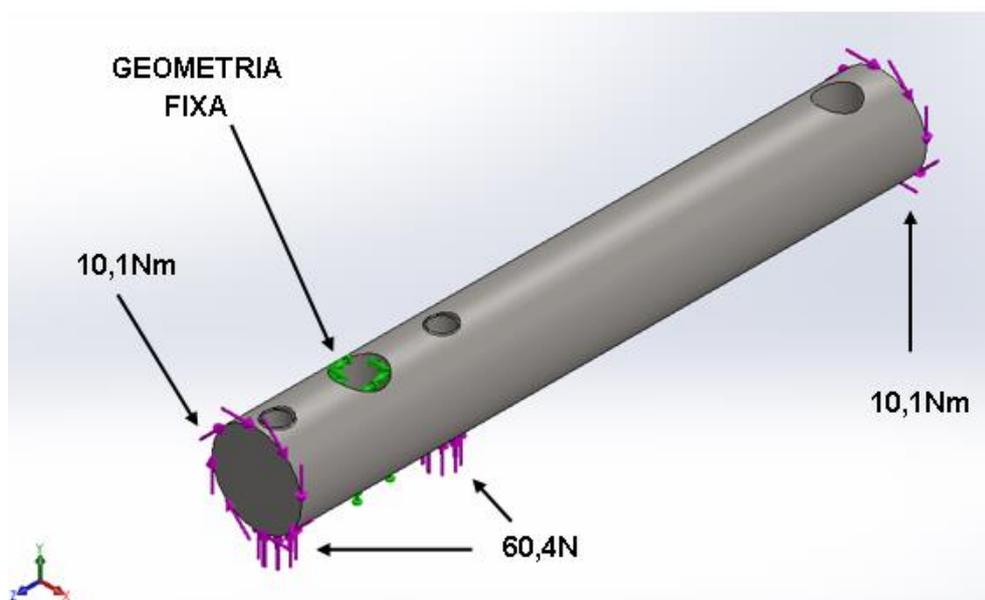
Fonte: Elaborado pelo Autor

Visualizando a vista tridimensional da Figura 92, compreende-se que à medida que o motor aplica o torque ao eixo acoplado no conjunto seguidor, ocorre uma força de reação na direção do eixo x no sentido contrário da rotação do motor. Essa reação acontece continuamente ao longo da aresta da came gerando um momento torsor ao eixo.

Observando ainda a Figura 92, quando o seguidor percorre a aresta horizontal da came, o pino comprime mola gerando uma força sobre a área do assentamento. Essa força na direção y gera uma força de reação distribuída para os parafusos que fixa o assentamento ao eixo, assim gerando uma solicitação de flexão.

A simulação de elementos finitos foi realizada com o recurso do *Solidworks Simulation*. Observando a Figura 93, a metodologia para a simulação foi aplicar a carga em uma pior condição, e para isso foi fixado um dos furos do eixo onde desliza o pino, aplicar a carga de 60,4 N distribuída sobre as faces no centro dos furos de rosca M3, e aplicar o torque máximo calculado de 10,1 Nm nas extremidades do eixo. O *software* de simulação considera um limite de escoamento de 352 MPa para o aço AISI/SAE 1020.

Figura 93 – Metodologia de Análise de Torção do Eixo



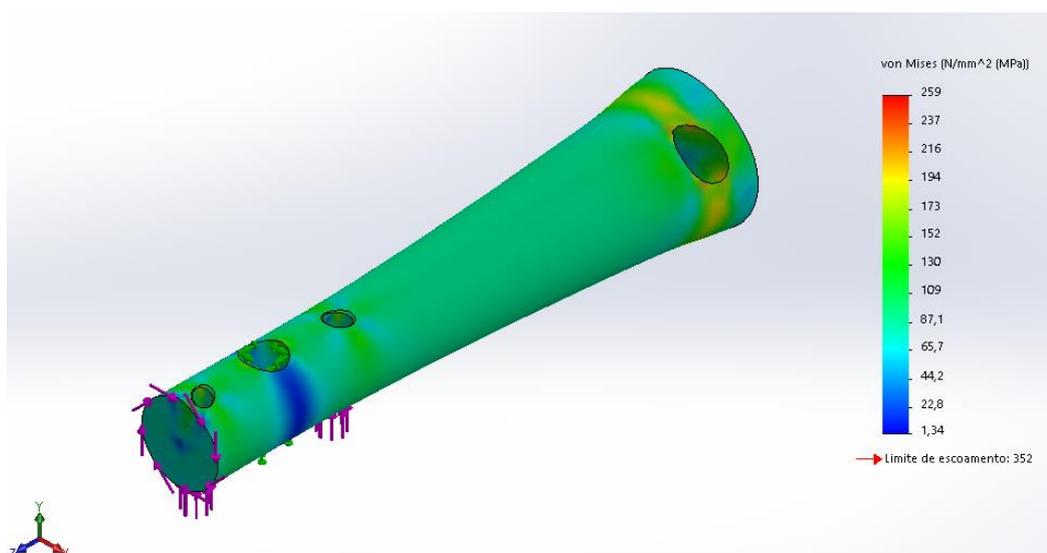
Fonte: Elaborado pelo Autor

Foi simulado esse estudo para duas situações. A primeira foi aplicando o torque calculado no tópico 4.4.1 da equação (11) da segunda situação com 10,1 Nm. A segunda aplicando o torque máximo do motor para 20 Nm.

Na Figura 94 mostra o resultado para o toque de 10,1Nm apresentando um resultado de tensão equivalente de Von Mises de 259 MPa, mostrando um valor abaixo de do limite de escoamento do material A

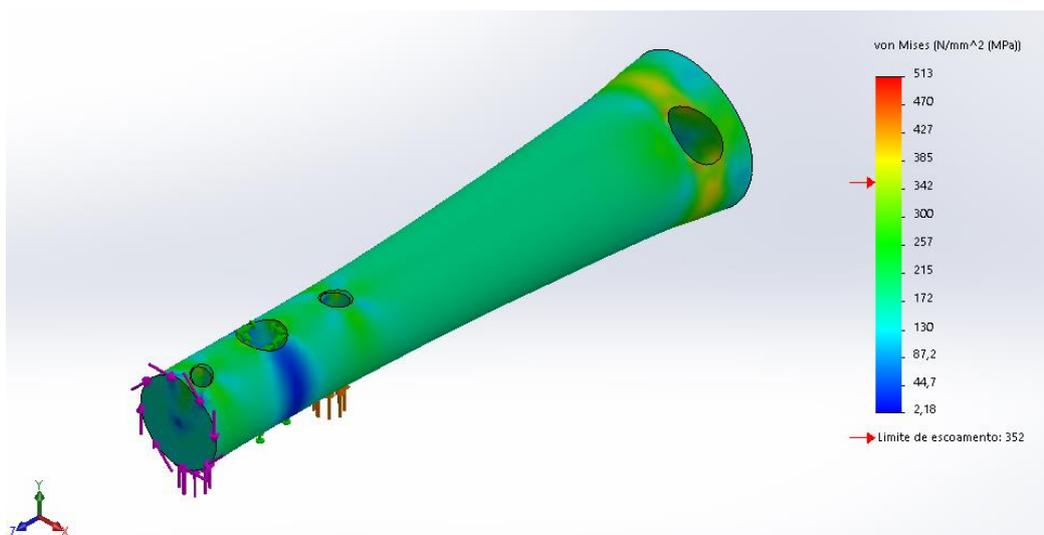
Figura 95 mostra o resultado da simulação para o torque máximo aplicado de 20 Nm apresentando um valor de 513 MPa, mostrando um valor acima do limite de escoamento do material.

Figura 94 – Resultados da Simulação para Torque de 10,1 Nm



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 95 - Resultados da Simulação para Torque de 20 Nm



Fonte: Elaborado pelo Autor

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise dos Resultado do Projeto Final Consolidado

O robô foi projetado com objetivo de se locomover em terrenos *off-road* e ter sua estrutura corporal similar à de um artrópode de seis patas. Conforme o referencial teórico do tópico 2.1, um veículo *off-road* precisa ter aderência, isolamento e estabilidade, e estes parâmetros foram adaptados para o projeto do robô. Além destes parâmetros, as geometrias das pernas foram modeladas para atravessar obstáculos e seguir as características de movimento de membros dos animais terrestres.

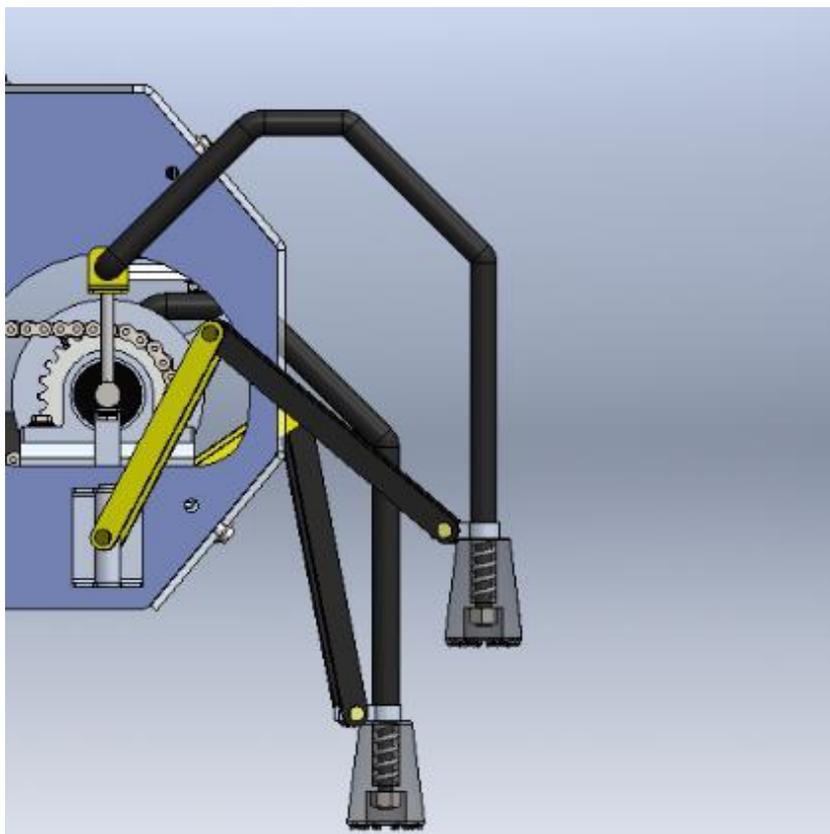
#### 5.1.1 Aderência

Com relação à aderência, o Artrópode Mecânico foi projetado com patas (Figura 39) de material borracha Neoprene, e esse material apresenta um alto coeficiente de atrito o que garante uma maior aderência em superfícies. E para se adaptar em terrenos como gramados, areias e chãos batidos, foram projetadas travas nas solas para garantir que o robô tenha uma maior se mantenha firme nestes terrenos.

#### 5.1.2. Isolamento.

Na montagem das pernas com as pastas, foi previsto a introdução de molas com a função de amortecer as irregularidades dos terrenos, garantindo que as vibrações das cargas geradas pelas forças normais das superfícies não sejam transferidas para os demais componentes e sim para o sistema de amortecimento montado da pata. A Figura 96, mostra esse sistema montado internamente nas patas.

Figura 96 – Sistema de Amortecimento das Pernas Frontais



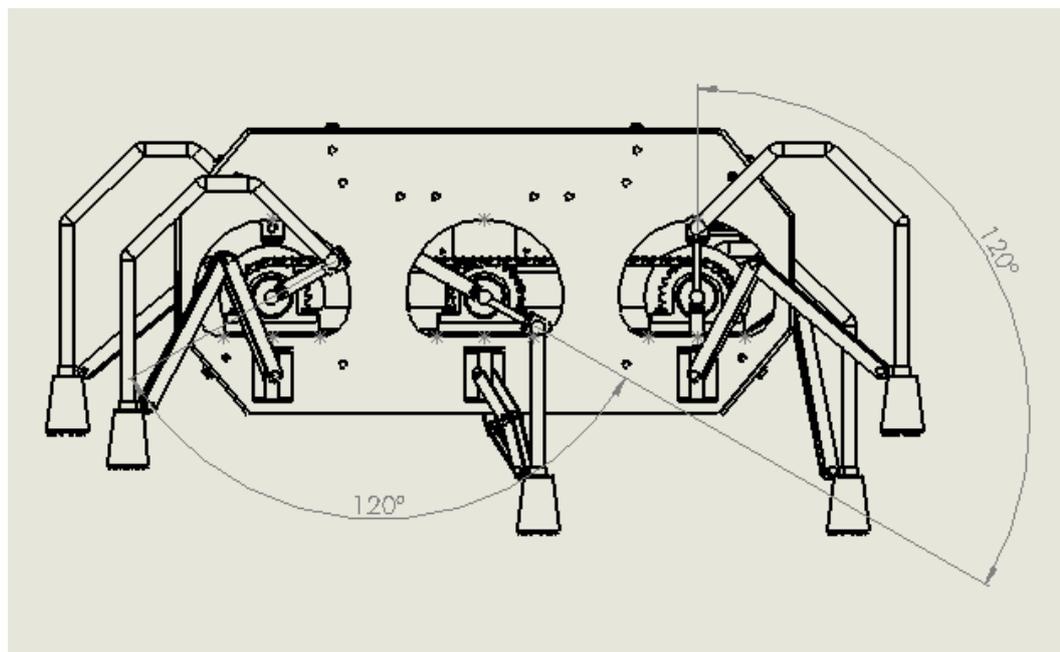
Fonte: Elaborado pelo Autor

### 5.1.3 Estabilidade

O Artrópode Mecânico foi projetado com três pares de pernas, e com pelo menos um par patas ao solo durante seu deslocamento. O que faz com que o mecanismo tenha estabilidade durante o seu processo de caminhar, é que a posição de um seguidor em relação ao outro, forma um ângulo de  $120^\circ$ . Essa posição faz com que um seguidor quando termina seu percurso na aresta horizontal da came, tenha outro seguidor de outra came na mesma direção começando o percurso na aresta horizontal. Isso faz com que sempre tenha pelo menos um par de patas ao solo durante o deslocamento do robô. A Figura 97 mostra a posição das patas medidas no ângulo de  $120^\circ$  na vista lateral esquerda em visualização 2D.

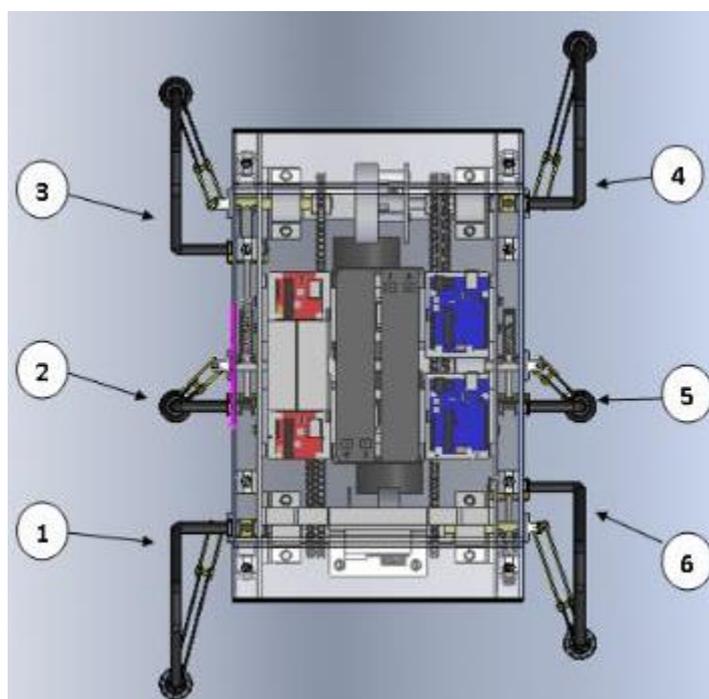
A Figura 98 mostra, através da vista superior, as pernas numeradas relacionando a um número de seguidor. Essas indicações de numerações é para facilitar o entendimento da estabilidade do robô durante o processo de caminhada no Gráfico 1 e no Gráfico 2.

Figura 97 – Posicionamento das Pernas



Fonte: Elaborado pelo Autor.

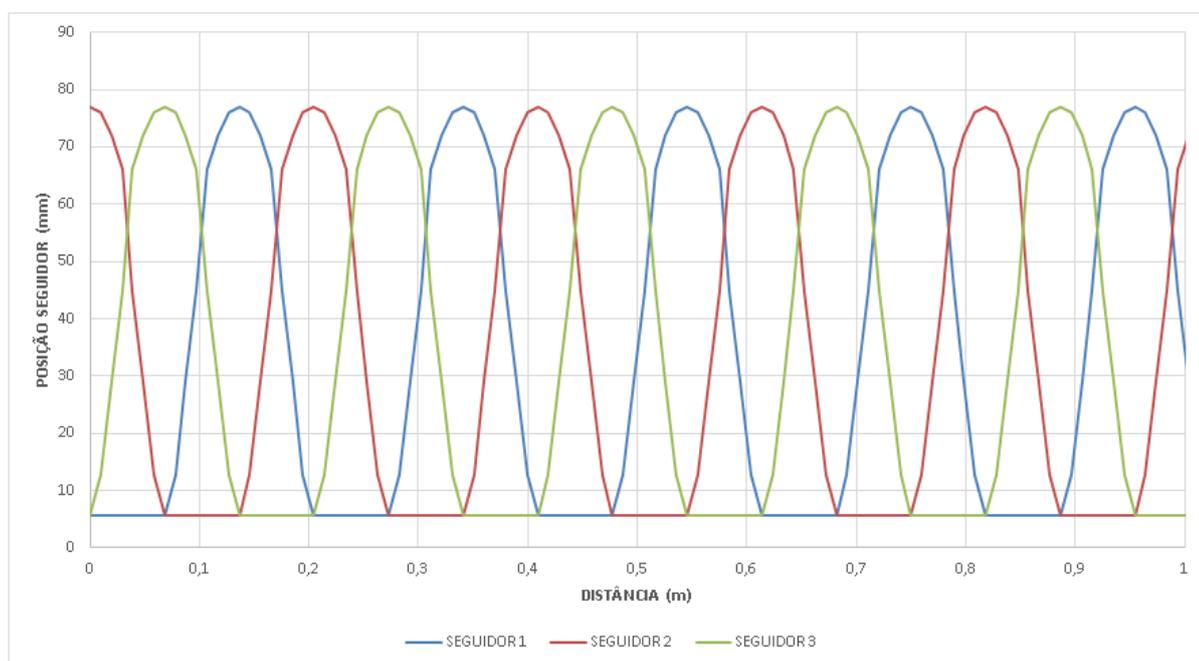
Figura 98 – Numerações das pernas em relação aos Seguidores



Fonte: Elaborado pelo Autor

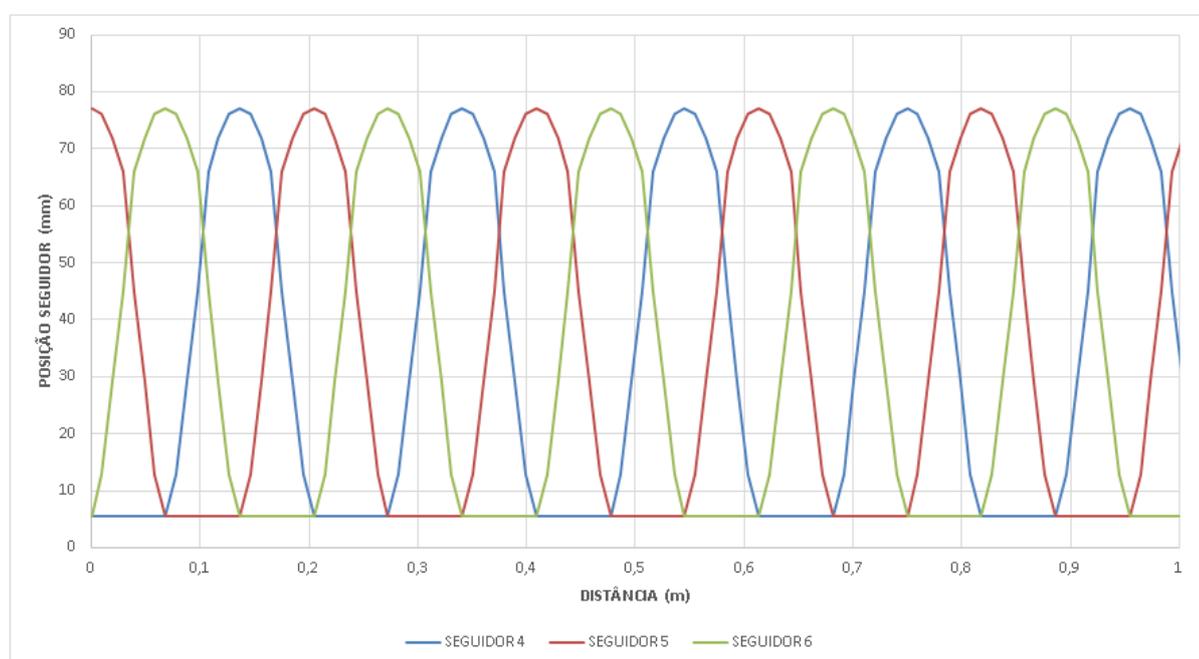
O Gráfico 1 mostra a trajetória dos seguidores sobre a came no lado esquerdo do robô ao longo de um trajeto de um metro, e o Gráfico 2 mostra essa simulação de movimentos pelo lado direito.

Gráfico 1 – Distância x Posição Seguidor Lado Esquerdo



Fonte: Elaborado pelo Autor

Gráfico 2 – Distância x Posição Seguidor Lado Direito



Fonte: Elaborado pelo Autor

Observando o Gráfico 1, quando o Artrópode mecânico estiver em seu repouso, o seguidor 1 (linha azul) começa o movimento na posição mais baixa da came (5,6 milímetros de distância de seu centro até a aresta horizontal da came), ou seja, na aresta horizontal quando a pata estiver no solo. O seguidor 3 (linha verde) está na

mesma posição do seguidor 1 com a pata no solo, porém a uma distância de 68,18 milímetros do centro do primeiro, ou seja, na outra extremidade. O seguidor 2 (linha vermelha) se encontra na posição mais alta da came com o máximo de sua pata levantada, a 71,14 milímetros do solo.

Quando o robô inicia seu movimento, seguidor 1 se desloca na aresta horizontal de 68,18 milímetros mantendo a pata ao solo, enquanto isso o seguidor 3 inicia seu movimento de subida e o seguidor 2 inicia sua descida. Esses movimentos vão ocorrendo de forma repetida durante o processo de caminhar do robô. Observando as linhas horizontais do gráfico, na posição de 5,6 milímetros, se conclui que a cada vez que um seguidor começa ou termina seus movimentos de subidas e descidas, sempre terá uma linha horizontal na posição de 5,6mm, e isso mostra haverá sempre uma pata ao solo.

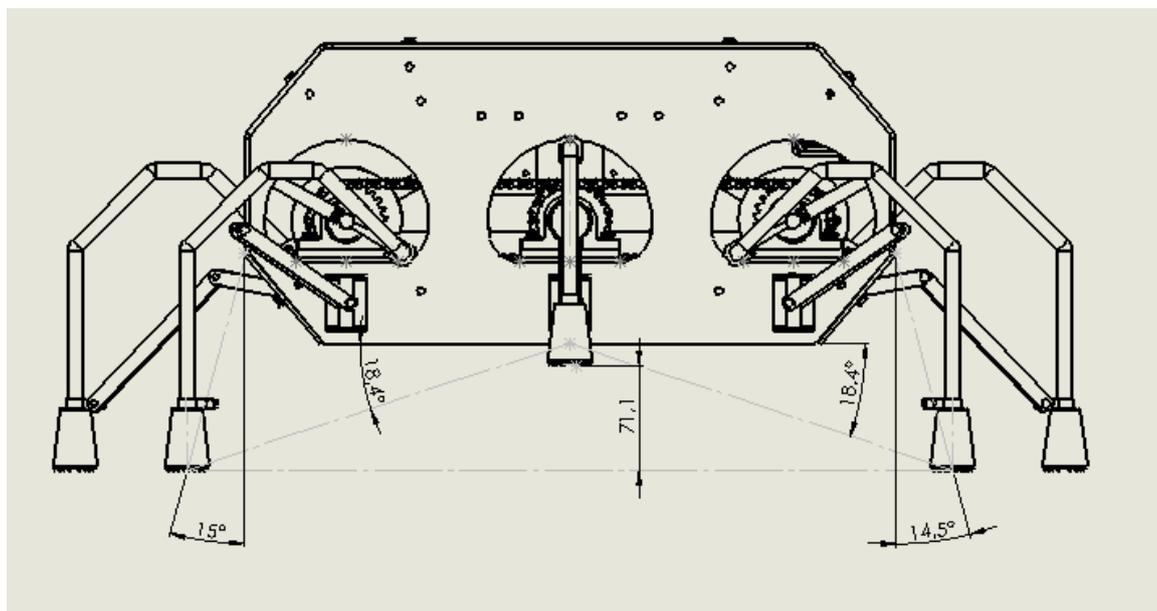
O Gráfico 2, que mostra a trajetória dos seguidores pelo lado direito, segue o mesmo movimento do lado esquerdo, o seguidor 4 acompanha o movimento do seguidor 1, o 5 acompanha o 2 e o 6 com o 3. Isso mostra que o robô terá estabilidade durante um trajeto.

Outro importante indicativo que estes gráficos apontam, é que na trajetória de um metro, os seguidores percorrem 5 voltas na came.

#### 5.1.4 Capacidade de Ultrapassar obstáculos

A geometria lateral chapa came, que sustenta o corpo do robô, foi projetada similar as dos tanques, citados no tópico 2.1.3, para ter um ângulo de ataque razoável para a locomoção do Artrópode Mecânico. A Figura 99 mostra os ângulos de ataque, saída e ventral medidos através das linhas centrais das patas, essas medições evidenciam que o robô é adequado para ultrapassar obstáculos. Além dessas medições, a Figura 99 mostra uma medida de 71,1 mm, que indica a altura máxima que a pata pode elevar. Essa altura da pata, é um importante indicativo que, durante o processo de caminhar do robô, as patas possam passar por cima de pequenas elevações durante seu percurso, com pedras, galhos etc.

Figura 99 – Ângulos de Obstáculos e Medição da Altura de Elevação da Pata



Fonte: Elaborado pelo Autor

## 5.2 Análise dos Resultados do Desempenho

A Tabela 15 mostra as comparações dos resultados para às duas condições determinadas no projeto.

Tabela 15 – Comparações dos Resultados

CONDIÇÃO 1		CONDIÇÃO 2	
Massa (kg)	11,33	Massa (kg)	12,33
Torque (Nm)	9,28	Torque (Nm)	10,11
Tempo Duração Carga (h)	1,42	Tempo Duração Carga (h)	2,55
Velocidade Angular (rad/s)	2,09	Velocidade Angular (rad/s)	2,09
Velocidade Linear (m/s)	0,43	Velocidade Linear (m/s)	0,43

Fonte: Elaborado pelo Autor

Fazendo uma análise dos resultados apresentados na Tabela 15, para os valores de massas apresentados, o da primeira condição a massa é menor que a da condição 2, isso apresentou devido à diferença de peso das baterias. Devido a essas diferenças de peso de baterias, o torque necessário para a movimentação do mecanismo apresentou um valor menor para a condição 1.

Apesar das diferenças de peso das baterias, o tempo de duração de carga para a condição 2 apresentou um valor maior, isso devido à bateria da condição 2 (Figura

78), mesmo energizando os dois motores, ter uma capacidade de carga mais elevada em relação ao da primeira (Figura 77).

Como o projeto Artrópode Mecânico, foi dimensionado para testar primeiramente o mecanismo, para a primeira condição, seria válida a aplicação das baterias de 2,3Ah. Caso o projeto físico fosse consolidado com a aprovação do mecanismo e do desempenho, a segunda condição seria a mais apropriada para um processo de fabricação. Se for analisar o tempo de duração para o objetivo de aplicação do Artrópode mecânico, como descrito nas justificativas no tópico 1.5, o tempo de 2,55 horas seria um tempo razoável para uma possível aplicação.

Mas para o caso de uma aplicação que poderia levar mais 2,55 horas, teria que ser estudada a condição de acoplar um motor com menor consumo de carga e com rotação maior e aplicar uma relação de transmissão para o movimentar o mecanismo, assim o tempo de duração de carga seria maior para aplicação.

### **5.3 Análise dos resultados das Resistências**

Os componentes mais críticos que sofreriam maiores solicitações de carga, são as pernas e os eixos que movimentam o robô.

#### **5.3.1 Pernas**

As simulações estudadas no *Ansys Mechanical* para as pernas, foram determinadas para verificar se elas teriam resistências o suficiente para suportar a carga do robô.

De acordo com NORTON (2013, p. 992), o aço SAE/AISI 1020 laminado a frio apresenta um valor tabelado de 393 MPa de resistência de escoamento de tração, e este foi o material considerado para às pernas do robô.

As medições realizadas na perna central mostraram que a perna pode resistir a carga solicitada, pois o valor apresentado de tensão máxima foi de 159,93 MPa, um valor bem abaixo do limite de escoamento do material da perna.

Quanto as medições realizadas na perna maior, considerando o estudo estático, mostraram que a perna resiste a carga aplicada, pois apresentou um valor máximo de tensão de Von Mises de 253,93 MPa, um valor abaixo do limite de escoamento do material.

O coeficiente de segurança  $C_s$  é dado pela equação (15)

$$C_s = \frac{\sigma_{eMáx}}{\sigma_{Máx Von mises}} \quad (15)$$

Onde

$\sigma_{eMáx}$  = Tensão máxima de Escoamento do material.

$\sigma_{Máx Von mises}$  = Tensão Máxima de Von Mises

Através da equação (15), os coeficientes de segurança  $C_s$  das pernas são determinados:

$$C_{s (Perna Central)} = \frac{393MPa}{159,93MPa} = 2,45$$

$$C_{s (Perna Maior)} = \frac{393MPa}{253,93MPa} = 1,54$$

Tanto a perna maior quanto a menor, mostraram um valor de  $C_s$  adequado para o projeto, estimando que ambos terão segurança para carregamento estático, porém, por ser um carregamento repetido, e por apresentarem um valor de  $C_s$  relativamente baixo, sinaliza-se fadiga de baixo ciclo o que não compromete o projeto visto que o robô não tem o requisito para operar por grandes durações de tempo.

### 5.3.2 Eixo

Para a simulação de resistência do eixo, simulado no *Solidworks*, na análise estática o estudo mostrou que o eixo pode ter resistência às forças de 60,4 N e com o torque de 10,1 Nm, pois apresentou um valor de tensão máxima de 259 MPa abaixo do limite de escoamento do material. Para a condição de 20 Nm, que seria a aplicação do torque máximo do motor, o eixo não apresentaria resistência mecânica nesta situação, pois o valor simulado apresentou uma tensão de Von Mises de 513 MPa acima do limite de escoamento. Nesta situação, para não precisar modificar o diâmetro do eixo, uma solução seria trocar o material do eixo para um mais resistente que o aço AISI / SAE 1020. O material avaliado para a substituição foi o aço AISI/ SAE 4340 temperado e revenido a 600 °F. A Tabela 16 mostra os dados do material.

Tabela 16 – Dados do Material AISI / SAE 4340

Número SAE/AISI	Condição	Resistência de Escoamento em Tração (MPa)	Resistência Máxima em Tração (MPa)
4340	Temperado e Revenido a 600°F	1586	1724

Fonte: Norton, (2013, p. 993)

Utilizando a equação (15) para descobrir o coeficiente de segurança do eixo, quando aplicado o torque máximo de 20 Nm, temos:

$$C_{s(Eixo)} = \frac{1586MPa}{513MPa} = 3,09$$

Com esse coeficiente de segurança calculado para esse novo material indicado, sinalizasse que o eixo poderá resistir ao número elevado de ciclos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi estudada uma alternativa de sistema mecânico para o deslocamento em terrenos *off-road* baseado no processo de caminhar de animais terrestres, e com base neste estudo, foi desenvolvido um projeto baseado no mecanismo de came e seguidor invertidos onde os resultados apresentaram que o sistema pode ser adequado para a movimentação.

Devido à complexidade do projeto, este trabalho abre uma possibilidade de continuação deste estudo, tanto para a fabricação para um modelo real quanto para um redimensionamento do modelo virtual de alguns componentes para melhorar o desempenho do Artrópode Mecânico.

O projeto do Artrópode Mecânico apresentado no trabalho, mostrou por cálculos de desempenho e análises gráficas de movimentação que ele pode ser aplicável a uma alternativa para deslocamento *off-road*.

Foi avaliado, através das simulações numéricas, a resistência mecânica dos componentes mais críticos, e com base nos resultados, foram descritos os diagnósticos necessários para garantir a segurança do projeto. É importante ressaltar que, as simulações foram realizadas no modo estático. No caso das simulações das pernas, durante o funcionamento do robô, o carregamento é repetido, o que sinaliza fadiga de baixo ciclo. Para a continuidade do estudo, deve-se determinar o número de ciclos de carregamento das pernas, considerando os fatores de correção de resistência à fadiga.

## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, N. Ângulos de ataque, de saída e ventral. O que são e para que servem? **Razão Automóvel**, 2017. Disponível em: <<https://www.razaoautomovel.com/2018/01/angulos-ataque-saida-ventral>>. Acesso em: 24 Outubro 2021.
- DEMBOSKI, F. R. **Estudo para utilização de componentes de suspensão de motocicleta em veículo urbano**. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville. 2014.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. III, 2009.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**. Tradução de Ronaldo Sérgio Biasi. 9. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), v. I, 2013.
- IJSPEERT, A. J. Imiter la nature et comprendre les. **RSERS**, 2 Junho 2018. Disponível em: <[http://www.rsesr.ch/Media/2018/2018\\_02\\_ljspeert\\_A.pdf](http://www.rsesr.ch/Media/2018/2018_02_ljspeert_A.pdf)>. Acesso em: 7 Outubro 2021.
- IJSPEERT, A. J. et al. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord. **Proceedings of School of Computer and Communication Sciences, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**, Lausanne, 9 Março 2007. Disponível em: <<https://science.sciencemag.org/content/315/5817/1416>>.
- KNIGHT, R. D. **Física: Uma Abordagem Estratégica**. 2. ed. São Paulo : Bookman Companhia Editora, v. I, 2009.
- MICHAEL, KATINA. The Latest Robotic War Machine. **Proceedings of the University of Wollongong**, Wollongong, 3 Outubro 2012. Disponível em: <<https://ro.uow.edu.au/eispapers/2773>>.
- MOV-MÁQUINAS. Mov-máquinas Ltda. **Mov-máquinas**, 28 s.d s.d. Disponível em: <<http://movmaquinas.com.br/pdfs/Correntes%20de%20norma%20ASA-DIN.pdf>>.
- MOYES, C. D.; SCHULTE, P. M. **Animal, Princípios de Fisiologia**. 2. ed. São Paulo: Artmed, 2010.
- NORTON, R. L. **Cinemática e Dinâmica do Mecanismos**. 1. ed. Nova York: AMGH Editora Ltda, 2009.
- NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, v. I, 2013.
- NUNES, T. Como as serpentes se locomovem? **Pontobiologia**, 17 Dezembro 2017. Disponível em: <<https://pontobiologia.com.br/como-serpentes-se-locomovem>>. Acesso em: 6 Novembro 2020.
- O TANQUE. **FORTE Forças Terrestres**, 24 Outubro 2020. Disponível em: <<https://www.forte.jor.br/2020/05/03/o-tanque-brasileiro-bernardini-mb-3-tamoyo>>.

RITZMANN, R.; ZILL, S. Neuroethology of Insect Walking. **Scholarpedia**, 9 Novembro 2013. Disponível em: <[www.scholarpedia.org/article/Neuroethology\\_of\\_Insect\\_Walking](http://www.scholarpedia.org/article/Neuroethology_of_Insect_Walking)>. Acesso em: 15 Setembro 2021.

SABÓIA FILHO, F. A. T.; NABARRETE, A. ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO ITA (ENCITA), 14, São José dos Campos. **Anais Eletrônicos**, 19 Outubro 2009. Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/xvencita/AER09.pdf>>. Acesso em: 20 Outubro 2020.

SENAI-SP. **Automotiva: Sistemas Mecânicos de Motocicletas**. 1. ed. São Paulo: Senai-SP editora, 2016.

SONNEWEND, M. A. **Clássicos do Brasil. JEEP**. 1. ed. Sao Paulo: Alaúde Editorial., 2017.

TEK8. Motor Motoredutor 12v Dc 20. **TEK8**, [s.d]. Disponível em: <[https://www.tek8.com.br/MLB-1901111968-motor-motoredutor-12v-dc-20-rpm-mb02012-ss-\\_JM#position=1&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=a65eb5e8-b132-4f0f-ad6b-ae17f5526e1a](https://www.tek8.com.br/MLB-1901111968-motor-motoredutor-12v-dc-20-rpm-mb02012-ss-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=a65eb5e8-b132-4f0f-ad6b-ae17f5526e1a)>. Acesso em: 12 Novembro 2021.

UNIPOWER. Bateria Estacionária VRLA 12V 2,3Ah Mod.UP1223. **https://unipower.com.br/produto/bateria-estacionaria-vrla-12v-23ah-mod-up1223/**, 2020. Disponível em: <<https://unipower.com.br/produto/bateria-estacionaria-vrla-12v-23ah-mod-up1223/>>. Acesso em: 17 Outubro 2021.

UNIPOWER. Bateria Estacionária VRLA 12V 9Ah Mod.UP1290. **Unipower**, 2020. Disponível em: <<https://unipower.com.br/produto/bateria-estacionaria-vrla-12v-9ah-mod-up1290/>>. Acesso em: 12 Outubro 2021.

VIOTTI, E. Suspensão Traseira. **Quatro Rodas**, São Paulo, 9 Novembro 2016. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/suspensao-traseira/>>. Acesso em: 21 Outubro 2020.

WINTERLE, P. **Vetores e Geometria Analítica**. 1. ed. São Paulo: Pearson, v. I, 2000.

XL250R, a mãe de todas as trail. **HONDA**, 10 Outubro 2019. Disponível em: <<https://www.honda.com.br/motos/blog/xl-250r-mae-de-todas-trail>>. Acesso em: 29 Novembro 2020.

YAMASHITA, M. T. **Projeto e Análise de Uma Plataforma Veicular com Lagartas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.