

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**

**MATHEUS SCOLA VERZA**

**PROJETO DA ESTRUTURA E DA TRANSMISSÃO DE UM ROBÔ PARA USO EM  
AMBIENTE HOSPITALAR**

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**MATHEUS SCOLA VERZA**

**PROJETO DA ESTRUTURA E DA TRANSMISSÃO DE UM ROBÔ PARA USO EM  
AMBIENTE HOSPITALAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico. Área de concentração: Projeto de  
Máquinas.

Orientador: Prof. Me. Sergio da Silva Kucera

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**MATHEUS SCOLA VERZA**

**PROJETO DA ESTRUTURA E DA TRANSMISSÃO DE UM ROBÔ PARA USO EM  
AMBIENTE HOSPITALAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico. Área de concentração: Projeto de  
Máquinas.

**Aprovado em:** 08/07/2019

**Banca Examinadora**

Prof. Sergio da Silva Kucera  
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Marcos Alexandre Luciano  
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Carlos Alberto Costa  
Universidade de Caxias do Sul

## RESUMO

Este trabalho consiste em apresentar uma forma inovadora da utilização da robótica em ambientes hospitalares, saindo do método tradicional e implantando tecnologia no envolvimento de profissionais da área da saúde com pessoas hospitalizadas. Tendo como objetivo de estudo a elaboração do projeto de um robô idealizado por professores das áreas de Engenharia Elétrica e Psicologia. O desenvolvimento iniciou com a pesquisa de modelos existentes que possam contribuir com o projeto. A partir da metodologia clássica do Processo de Desenvolvimento de Produto, foram desenvolvidos os projetos dos sistemas de propulsão e da estrutura de um robô. Os requisitos de projeto juntamente com seus valores meta, deram suporte às escolhas que definiram o projeto. Assim, optou-se em utilizar: duas rodas de tração, acionadas por transmissões independentes, porém idênticas criadas a partir de três pares de engrenagens, tendo por objetivo reduzir a velocidade e aumentar o torque gerado por motores elétricos de passo também independentes. Para os demais pontos de apoio utilizaram-se rodas bobas. Já para estrutura geral foram selecionados perfis tubulares comerciais de espessura reduzida, juntamente com chapas de aço, em sua maioria perfurada, com a intenção de reduzir o peso do conjunto, destinadas ao fechamento. O sistema estrutural será o responsável por comportar todos os componentes e caracterizar a fisionomia de um robô, este também será condicionado a uma análise de elementos finitos. As especificações e os formatos finais foram apresentados na forma de desenhos e tabelas de materiais. Por fim, concluiu-se de maneira comparativa o atendimento aos requisitos de projeto, aptos em sua maioria, salientando os de maior grau de importância.

**Palavras-chave:** Robô. Uso de robótica em hospitais. Desenvolvimento de robôs. Projeto mecânico de transmissões. Dimensionamento estrutural.

## ABSTRACT

This work presents an innovative way of using robotics in hospital environments, leaving the traditional method and implanting technology in the involvement of health professionals with hospitalized people. The objective of this study was the elaboration of a robot project designed by teachers in the areas of Electrical Engineering and Psychology. Development began with the search for existing models that could contribute to the project. From the classical methodology of the Product Development Process, the designs of the propulsion systems and the structure of a robot were developed. Project requirements along with their target values supported the choices that defined the project. In this way, two traction wheels, driven by independent, but identical transmissions created from three pairs of gears, were chosen to reduce the speed and increase the torque generated by independent electric step motors. For the other support points, silly wheels were used. For general structure, commercial tubular profiles of reduced thickness were selected, together with steel plates, mostly perforated, with the intention of reducing the weight of the assembly, destined to the closing. The structural system will be responsible for behaving all components and characterizing the physiognomy of a robot, it will also be conditioned to a finite element analysis. The specifications and final formats were presented in the form of drawings and tables of materials. Finally, it was concluded in a comparative way the fulfillment of the most important design requirements, highlighting those of greater importance.

**Keywords:** Robot. Use of robotics in hospitals. Development of robots. Mechanical design of transmissions. Structural dimensioning.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de Desenvolvimento de Produtos por Rozenfeld et al. (2006) .....	17
Figura 2 – Formulação e cálculo do problema por Norton (2004) .....	18
Figura 3 – Processo de Desenvolvimento de Produtos por Pahl e Beitz (1996) .....	19
Figura 4 – Estrutura típica do QFD .....	22
Figura 5 – Tipos de ciclos de Projeto Detalhado .....	26
Figura 6 – Componente de forças atuantes em um corpo .....	26
Figura 7 – Força nos dentes de uma engrenagem .....	32
Figura 8 – Fluxograma de desenvolvimento .....	36
Figura 9 – Robôs construídos por alunos para competição .....	37
Figura 10 – Modelo de robô para reabilitação do quadril .....	38
Figura 11 – Modelo de robô para logística hospitalar .....	39
Figura 12 – Modelo de robô para uso agrícola .....	39
Figura 13 – Modelo de robô para terrenos acidentados .....	40
Figura 14 – QFD (Matriz Casa da Qualidade) .....	44
Figura 15 – Estrutura de Funções .....	45
Figura 16 – Esboço primário Proposta 1 e 2 .....	48
Figura 17 – Esboço primário Proposta 3 e 4 .....	48
Figura 18 – Forças presentes na roda .....	50
Figura 19 – Esforços presentes no eixo .....	56
Figura 20 – Gráfico de esforço cortante .....	56
Figura 21 – Gráfico de momento fletor .....	57
Figura 22 – Gráfico de momento torsor .....	57
Figura 23 – Visão geral da transmissão .....	63
Figura 24 – Forças presentes na estrutura geral .....	61
Figura 25 – Estrutura inferior .....	63
Figura 26 – Estrutura superior .....	64
Figura 27 – Considerações estruturais para Elementos Finitos .....	65
Figura 28 – Análise geral por Elementos Finitos .....	66
Figura 29 – Análise de pontos críticos por Elementos Finitos .....	66
Figura 30 – Considerações estruturais para Elementos Finitos .....	67
Figura 31 – Análise geral por Elementos Finitos .....	68
Figura 32 – Análise de pontos críticos por Elementos Finitos .....	68

Figura 33 – Desenho geral dos componentes da transmissão .....	69
Figura 34 – Desenho geral estrutura inferior.....	71
Figura 35 – Desenho geral estrutura inferior com fechamentos.....	72
Figura 36 – Desenho geral estrutura superior.....	73
Figura 37 – Desenho geral estrutura superior com fechamentos.....	75
Figura 38 – Desenho geral do robô .....	76
Figura 39 – Situação do robô em rampa.....	77

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Processo de Desenvolvimento de Produtos .....	17
Quadro 02 – Comparativo de etapas do PDP para duas referências .....	20
Quadro 03 – Contribuição de projetos existentes .....	41
Quadro 04 – Especificações iniciais de Projeto.....	42
Quadro 05 – Matriz Morfológica.....	46
Quadro 06 – Propostas Selecionadas.....	47
Quadro 07 – Matriz de Decisão .....	49
Quadro 08 – Seleção de materiais para engrenagens .....	55
Quadro 09 – Componentes gerais da transmissão .....	70
Quadro 10 – Componentes gerais da estrutura inferior .....	71
Quadro 11 – Fechamentos da estrutura inferior .....	73
Quadro 12 – Componentes gerais da estrutura superior.....	74
Quadro 13 – Fechamentos da estrutura superior .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Dados iniciais de entrada .....	50
Tabela 02 – Cálculo dos pares de engrenagens .....	52
Tabela 03 – Fator Geométrico de Resistência a Flexão (J) .....	53
Tabela 04 – Fatores Modificadores de Condições (K) para 03° par de engrenagens .....	53
Tabela 05 – Fatores aplicados para Fadiga de Flexão (K) .....	54
Tabela 06 – Fatores teóricos de concentração de tensão .....	58
Tabela 07 – Fatores modificadores do Limite de Resistência .....	58
Tabela 08 – Dados para possibilitar Projeto .....	59

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	AMBIENTE DE REALIZAÇÃO .....	13
1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	13
1.2	OBJETIVOS .....	14
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS .....	15
<b>2.1.1</b>	<b>Planejamento de Projeto .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Projeto Informacional .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Projeto Conceitual .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Projeto Detalhado .....</b>	<b>25</b>
2.2	ANÁLISE DE CARREGAMENTOS.....	26
<b>2.2.1</b>	<b>Carregamento em um corpo .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Flexão .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Deformação axial .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Torção .....</b>	<b>29</b>
2.3	ELEMENTOS DE MÁQUINA EM PROJETOS MECÂNICOS .....	30
<b>2.3.1</b>	<b>Correias e polias.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Engrenagens .....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Eixos .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Chavetas.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Mancal de elementos rolantes .....</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....</b>	<b>36</b>
3.1	ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO .....	36
3.2	APRESENTAÇÃO DE MODELOS SIMILARES .....	37
<b>3.2.1</b>	<b>Contribuição de modelos similares.....</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....</b>	<b>42</b>
4.1	PROJETO INFORMACIONAL.....	42
<b>4.1.1</b>	<b>Especificações de Projeto.....</b>	<b>42</b>
4.2	PROJETO CONCEITUAL .....	45

<b>4.2.1</b>	<b>Dimensionamento da Transmissão.....</b>	<b>50</b>
4.2.1.1	Dimensionamento das Engrenagens .....	51
4.2.1.2	Dimensionamento dos Eixos.....	55
4.2.1.3	Especificações de pinos, anéis elásticos e rolamentos .....	60
<b>4.2.2</b>	<b>Dimensionamento da Estrutura.....</b>	<b>61</b>
4.3	PROJETO DETALHADO .....	69
<b>4.3.1</b>	<b>Detalhamento da transmissão .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Detalhamento da estrutura inferior .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Detalhamento da estrutura superior .....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR .....</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXO 2 – ESPECIFICAÇÃO DO ROLAMENTO .....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO 3 – ESPECIFICAÇÃO DO PINO ELÁSTICO .....</b>	<b>84</b>
	<b>ANEXO 4 – ESPECIFICAÇÃO DO ANEL ELÁSTICO .....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXO 5 – ESPECIFICAÇÃO DA RODA MOTORA .....</b>	<b>86</b>
	<b>ANEXO 6 – ESPECIFICAÇÃO DA RODA BOBA .....</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO 7 – ESPECIFICAÇÃO DA BATERIA .....</b>	<b>88</b>
	<b>ANEXO 8 – COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO.....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Quando se tem a possibilidade de inserir tecnologias vinculadas à educação em ambientes hospitalares, especialmente com foco em crianças que apresentam saúde insatisfatória e tristeza pela situação em que estão e conseqüentemente se afastam de suas atividades escolares, consegue-se resgatar o ensino de maneira mais interessante principalmente por estarem inseridos em ambiente hospitalar, não permitindo que a criança se afaste totalmente de seu aprendizado.

A partir do momento em que membros da sociedade criam situações compartilhadas, envolvem a todos em um ciclo de evolução que é essencial para a transformação positiva do espaço social. Em outras palavras este espaço acaba por ser valorizado pela atividade de crescimento intelectual do indivíduo. O espaço social então deixa de ser um ambiente neutro e passa a se tornar envolvido com o processo de desenvolvimento que nele ocorre (RESNICK, 2000 apud CAMPOS, 2017).

O campo da robótica educacional encontra-se em uma situação de incessante crescimento, não só como campo de estudo e pesquisa, mas sim como aplicação e desenvolvimento propriamente dito, abrangendo todos os níveis de ensino, carregando consigo grande potencial de impacto a natureza da educação, isto é, na forma de ensinar e aprender, tornando o ambiente de aprendizado mais atrativo, despertando maior interesse por parte do aluno.

Estudos na área revelam que a robótica possui grande potencial de difundir o conhecimento entre os jovens de forma mais perceptível nas mais diversas áreas do conhecimento seja física, matemática, engenharia ou computação. Destacam-se nos últimos 20 anos um aumento considerável no número de teses e dissertações que abordam o uso de robótica em ambiente escolar, entretanto não se tem a inserção sistemática desta no currículo escolar nacional. Mesmo com o uso de tecnologias cada vez mais frequentes no cotidiano da comunidade, na educação a tendência é um caminho mais lento e mantendo as práticas pedagógicas tradicionais (CAMPOS, 2017).

Em meados dos anos noventa, plataformas de aprendizado embasadas em robôs começaram a ser utilizadas, diversificando a proposta de ensino por parte das Instituições. Em paralelo a essas atividades, se dá início a um novo campo de desenvolvimento nomeado “Robótica educativa”.

Neste mesmo período, como forma de expansão empresas assumem o papel de desenvolver material de apoio para tais atividades, a exemplo da empresa LEGO, que lançou

produtos como o Lego MindStorms promovendo uma proposta pedagógica inserido na ciência e tecnologia (KUMAR, 2004 apud RAMÍREZ e SOSA, 2013).

### 1.1 AMBIENTE DE REALIZAÇÃO

O trabalho foi realizado em parte nas dependências da Universidade de Caxias do Sul em ambientes de estudo teórico como biblioteca, salas de aula e de orientação, e parte na residência do autor.

### 1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Professores da Universidade de Caxias do Sul, das áreas de Engenharia Elétrica e Psicologia, idealizaram um equipamento para uso no Hospital Geral, localizado na mesma instituição. Pretende-se utilizado no cotidiano de crianças hospitalizadas, mais precisamente nas áreas de lazer onde profissionais da área da saúde farão sua utilização levando entretenimento de forma moderna.

O estudo evoluiu para um conceito de um robô, que deveria se movimentar por motor elétrico e dispor de uma estrutura capaz de sustentar equipamentos de áudio, vídeo, baterias e sistemas eletrônicos.

Para o desenvolvimento da estrutura e do sistema de movimentação do robô, torna-se necessário o conhecimento e o suporte da Engenharia Mecânica, assumido por este trabalho.

Os demais sistemas, eletroeletrônico e de controle estão sendo desenvolvidos em conjunto com alunos do curso de Engenharia de Controle e Automação que, por sua vez, possuem alguns elementos definidos como telas de LCD e possíveis motores a serem utilizados. Desta maneira estes itens deverão ser levados em consideração para o dimensionamento dos componentes mecânicos.

Pretende-se agregar valor aos sistemas fazendo uso de plataformas programáveis, com o intuito de torná-lo mais versátil e funcional, assim o robô será controlado por dispositivo remoto.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Elaborar o projeto detalhado da estrutura e do sistema de transmissão de um robô idealizado, para uso em atividades de lazer e ensino de crianças hospitalizadas.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Com a finalidade de atender ao objetivo geral, definiram-se os específicos abaixo:

- a) definir especificações de projeto;
- b) pesquisar modelos similares existentes;
- c) definir configuração geral do robô;
- d) dimensionar e selecionar os componentes necessários do sistemas;
- e) simular movimentos do robô a fim de verificar possíveis interferências;
- f) elaborar a documentação gráfica pertinente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentadas as etapas do processo de desenvolvimento de um produto, e posteriormente serão apresentados os esforços e elementos que se farão presentes no projeto específico do robô.

### 2.1 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Projeto, é a *“ideia que se forma de executar ou realizar algo no futuro, é um plano um intento ou desígnio”* (FERREIRA, 1986 apud BACK et al., 2008).

Desenvolver produtos consiste em um conjunto de tarefas, que alicerçado às necessidades de mercado e nas condições tecnológicas disponíveis, torna-se possível estabelecer especificações de projeto de um determinado produto e de seu respectivo processo produtivo. Envolve também atividades de acompanhamento do produto após seu lançamento, a fim de realizar possíveis revisões ao longo de seu ciclo de vida até o momento em que este seja descontinuado (ROZENFELD et al., 2006).

No momento atual, é admirável que projetos de alta complexidade sejam desenvolvidos sem o uso de procedimentos específicos ou de metodologias. A partir de 1960 é possível encontrar obras de autores que abordam a atividade de desenvolvimento de produto de uma forma mais sistemática, como Asimov (1962), Cain (1969), Krick (1965), Vidosic (1969) e Woodson (1966). O desenvolvimento de mecanismos de projeto de produtos teve três marcos fundamentais em sua história de evolução: na Alemanha, com a publicação de trabalhos de Pahl e Beitz (1972 - 1974); nos Estados Unidos com trabalhos da ASME (1985 - 1986); e no Brasil com a primeira obra em português (BACK, 1983 apud BACK et al., 2008).

O desenvolvimento de produtos é visto como um processo de negócio. Em um mundo onde clientes se tornam cada vez mais exigentes e o mercado institui mudanças com maior frequência, visando atender continuamente às necessidades, o Processo de

Desenvolvimento de Produtos (PDP) entra em cena para atuar com dinamismo e flexibilidade, permitindo que um novo artigo seja implementado no tempo adequado, mantendo a qualidade esperada e atendendo a um custo competitivo (ROZENFELD et al., 2006).

As atividades elaboradas ao longo do desenvolvimento de um produto iniciam-se de forma qualitativa e abstrata, tornando-se cada vez mais reais e quantitativas. Estas atividades aplicadas a métodos práticos são consideradas fundamentais no PDP e na resolução de suas

tarefas, permanecendo em constante análise de todo o processo evolutivo, tomando as decisões mais convenientes em cada etapa (PAHL, 2005).

Segundo Back et al. (2008), com a globalização da economia, as empresas tiveram que propor e praticar soluções que tornassem seus produtos mais competitivos para fazer frente inclusive com a concorrência internacional. Isto gerou a necessidade de apresentar se apresentar produtos com maior qualidade e valor agregado, que fundamentalmente são alcançados com a alta qualidade do projeto de produto. Para se desenvolver um produto com eficiência é necessário responder as seguintes questões: “o que fazer? Para quem fazer? Quando fazer? Com que fazer? E como fazer?” Back et al. (2008). Para se manter competitivo, o produto deverá ser executado de forma integrada, ou seja, trata-se de uma equipe de profissionais das mais diversas competências exercendo suas funções simultaneamente.

O PDP é o campo de conexão entre a empresa e o mercado, sendo responsável em propor melhores soluções para dadas situações. Buscando desenvolver um produto no tempo adequado, cria-se e um processo de desenvolvimento organizado e coerente, favorecendo a competitividade no mercado. De mais a mais, deve-se assegurar a possibilidade de manufatura do produto e atender aos requisitos de projeto. Argumenta-se que as definições alternativas feitas no início do ciclo de desenvolvimento são de extrema importância para o processo, representando 85% do custo do produto final, sendo assim os 15% restantes correspondem a todas as outras fases posteriores (ROZENFELD et al., 2006).

Projetar trata-se não só de criar um plano que atenda a uma necessidade, mas também que solucione um problema. Caso o plano a ser posto em prática resulte na elaboração de algo com aplicação prática, então o produto deverá ser: funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e mercável. (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005)

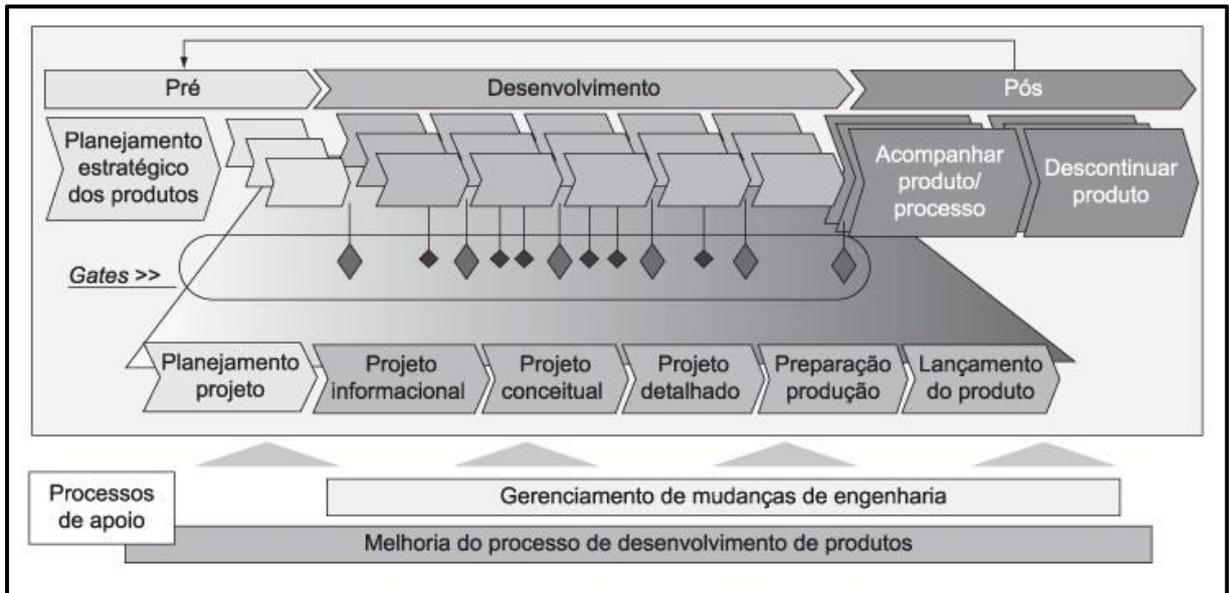
O modelo de PDP de Rozenfeld et al. (2006), direcionado principalmente a empresas de manufatura e de bens de consumo, é caracterizada em 3 macrofases conforme representa a Figura 1.

Para os mesmos autores as macrofases de pré e pós-desenvolvimento são consideradas mais genéricas, podendo ser aplicadas a qualquer tipo de produto. Já a macrofase intermediária, desenvolvimento, aborda aspectos tecnológicos equivalentes a detalhes do produto e é dividida nas 5 fases a seguir:

- a) projeto informacional;
- b) projeto conceitual;

- c) projeto detalhado;
- d) preparação para produção;
- e) lançamento do produto;

Figura 1 – Processo de Desenvolvimento de Produtos por Rozenfeld et al. (2006)



Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006).

Segundo Norton (2004), a metodologia de projetos é fundamentalmente um exercício de atividade aplicada. Sua metodologia de projetos é descrita no Quadro 1, com as 10 etapas apresentadas em ordem cronológica.

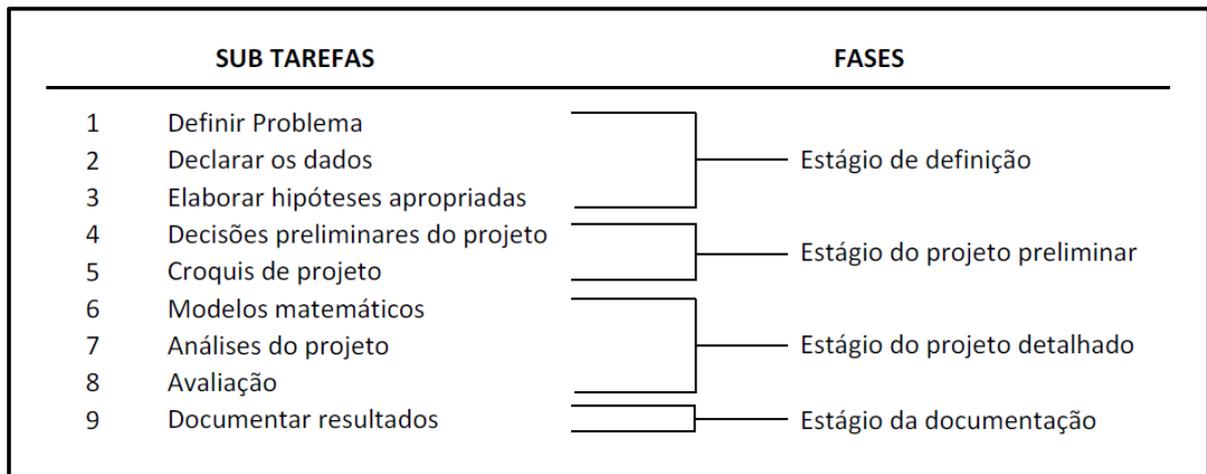
Quadro 1 – Processo de Desenvolvimento de Produtos segundo Norton (2004)

FASE	DESCRIÇÃO
1	Identificação da necessidade
2	Pesquisa de suporte
3	Definição de objetivos
4	Especificação de tarefas
5	Síntese
6	Análise
7	Seleção
8	Projeto detalhado
9	Protótipo e teste
10	Produção

Fonte: adaptado de Norton. (2004).

Para o mesmo autor, é de extrema importância que o engenheiro ou o projetista responsável por um dado projeto desenvolva hábitos organizacionais, pois problemas complicados exigem uma abordagem sistematizada e ordenada. Assim caso seja solicitado algum tipo de retrabalho posterior, o raciocínio do indivíduo possa ser reconstruído de forma breve. Para isto Norton (2004) sugere um procedimento prático que envolve um grupo de fases e suas respectivas tarefas, conforme Figura 2.

Figura 2 – Formulação e cálculo do problema por Norton (2004)



Fonte: adaptado de Norton. (2004).

Pahl e Beitz (1996) defendem a hipótese de ser mais comum a divisão do Processo de Desenvolvimento de Produto nas quatro fases principais abaixo, tornando o fluxo de trabalho mais vantajoso.

- a) planejamento/esclarecimento da tarefa: especificação de informações;
- b) projeto conceitual: especificação do princípio; projeto preliminar especificação de desenhos construtivos prévios;
- c) projeto detalhado: especificação de produção.

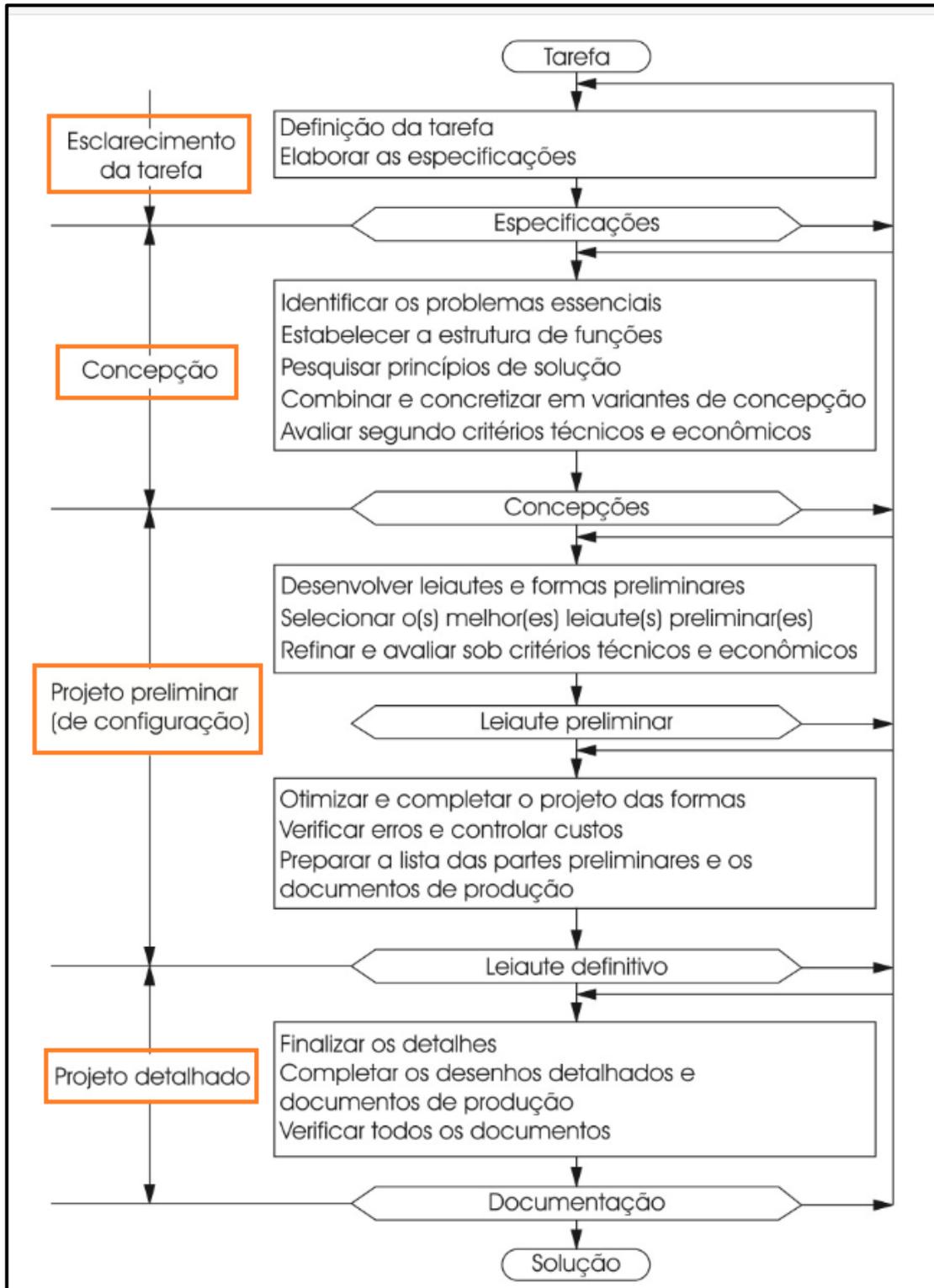
A Figura 3 apresenta o processo sustentado por Pahl e Beitz (1996), subdividido em quatro fases, indicando suas respectivas ações e os resultados em cada uma delas.

Pode-se observar que a divisão e a nomenclatura das etapas de PDP defendidas por Rozenfeld et al. (2006) são diferentes das de Pahl e Beitz (1996), porém se equivalem conforme relações apresentadas no Quadro 2.

Abaixo são detalhadas as etapas do PDP, apresentadas segundo a divisão de Rosenfeld et al. (2006), até a fase de Projeto Detalhado.

As etapas posteriores de Preparação para Produção e Lançamento do Produto foram desprezadas, pois estão além do escopo da proposta.

Figura 3 – Processo de Desenvolvimento de Produtos por Pahl e Beitz (1996)



Fonte: adaptado de Pahl e Beitz. (1996).

Quadro 2 – Comparativo de etapas do PDP para duas referências

Conforme Rozenfeld et al. (2006)	Conforme Pahl e Beitz (1996)
Planejamento de projeto	Planejamento/esclarecimento da tarefa
Projeto informacional	
Projeto conceitual	Projeto conceitual
	Projeto preliminar
Projeto detalhado	Projeto detalhado

Fonte: o autor (2018).

### 2.1.1 Planejamento de Projeto

Nesta fase devem ser realizados esforços no sentido de abordar todas as atividades e recursos, encontrando a melhor forma de conectá-los a fim de minimizar erros no decorrer do percurso (ROZENFELD et al., 2006).

Para Baxter (2000) a atividade de Planejamento, é uma das mais difíceis do processo de desenvolvimento de produto. Neste momento ainda experimenta-se a sensação de trabalhar em vazio, ou seja, não existe um desenvolvimento iniciado. Se o desejo é ter um produto com chance de sucesso no mercado, deve-se cumprir o planejamento com autodisciplina, mantendo-se engajado nessa atividade a fim de prevenir frustrações nas etapas posteriores.

Como resultado desta etapa, espera-se obter uma documentação que conterão informações relevantes, como escopo de projeto e de produto (conceito), regularidade na execução das atividades, prazos, orçamentos, definição dos responsáveis para cada tarefa, recursos para a execução do projeto e procedimentos para verificação da qualidade (ROZENFELD et al., 2006).

### 2.1.2 Projeto Informacional

Ao final da fase anterior, têm-se elementos que fornecem uma definição do escopo do produto e suas respectivas definições e restrições a cerca do projeto, incluindo orientações para de viabilidade técnica e econômica. O estágio corrente tem por objetivo desenvolver um conjunto de informações nomeado especificações-meta do produto. Este grupo deverá não só orientar o desenvolvimento de soluções, mas também fornecer a base que possibilita produzir

os critérios de avaliação e de tomada de decisão das etapas subsequentes do processo de desenvolvimento (ROZENFELD et al., 2006).

Neste momento, dependendo da aplicação do método, busca-se o entendimento claro e completo das definições do produto a ser desenvolvido ou de um possível problema a ser enfrentado. Desta forma institui-se o conceito de identificar as necessidades dos clientes, que após serem analisadas, tornam-se requisitos de projeto para um determinado produto.

No Projeto Informacional é possível deduzir algumas expressões de extrema importância, vinculando termos com sua respectiva definição, conforme exposto abaixo:

- a) escopo do produto: primeira descrição do produto, e primeira versão, especificações-meta que serão revisadas e detalhadas no decorrer do processo. Importante que seja o modelo mais detalhado possível com base no conhecimento atual do produto;
- b) ciclo de vida do produto: descrição gráfica da história do produto, descrição de estágios desde as primeiros esforços para a obtenção do produto até o seu pós venda e descontinuidade;
- c) necessidades dos clientes: desejos deles que expressem características do produto;
- d) requisitos dos clientes: suas necessidades, organizadas e estruturadas;
- e) requisitos do produto: particularidades que o produto deverá ter, com base nos valores-metas provindos dos requisitos dos clientes;
- f) especificações-meta: grupo de objetivos que o produto deverá atender para refletir as necessidades do cliente;
- g) informações adicionais qualitativas: informações complementares aos requisitos.

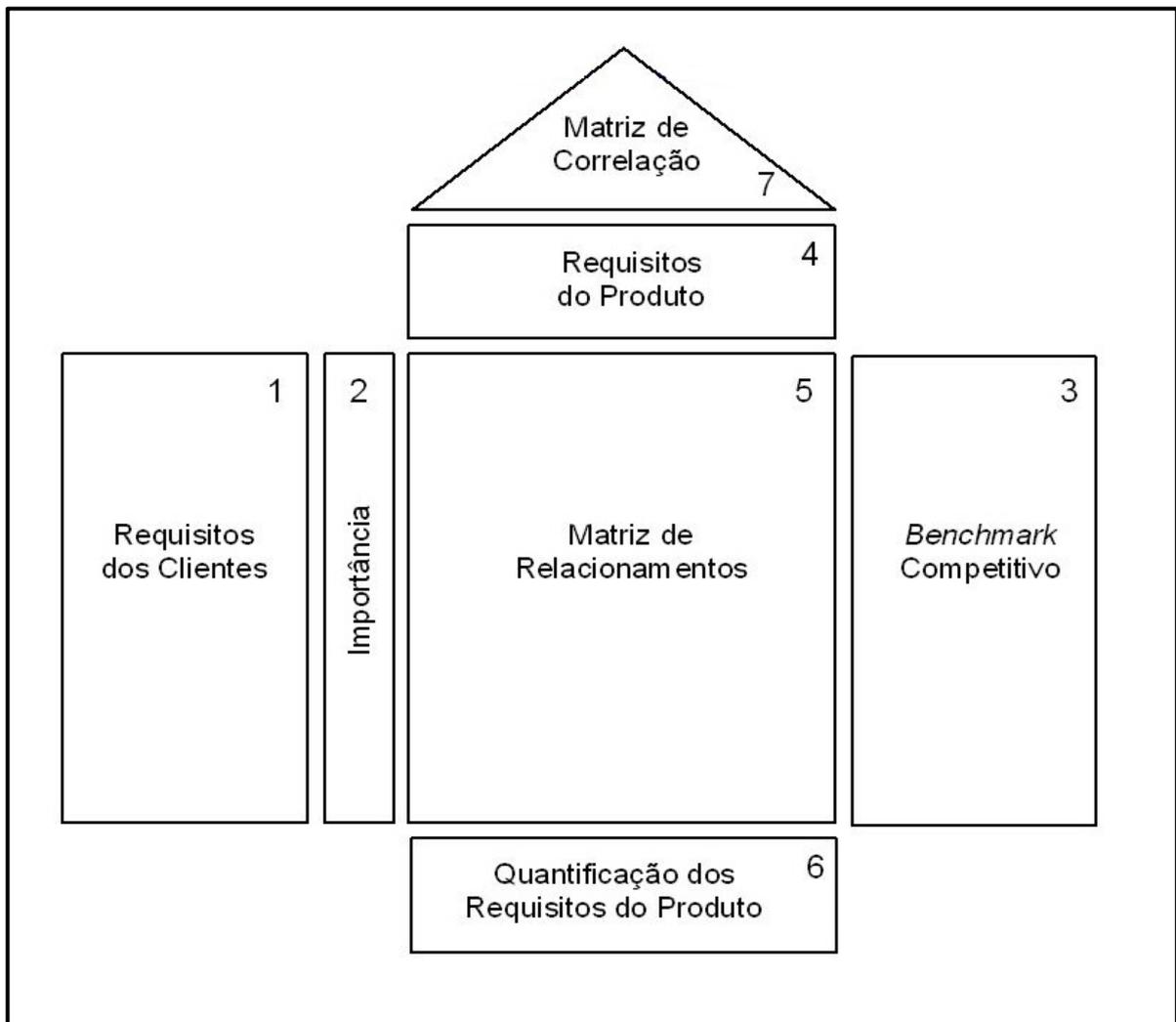
Rozenfeld et al. (2006) destacam quatro momentos de decisão, ou subfases, que refletem no contexto geral do processo de desenvolvimento. A execução das atividades relacionadas a cada uma das subfases é apoiada por meio de algumas ferramentas, conforme apresentado a seguir:

- a) revisar e atualizar o escopo do produto: questionários e entrevistas, pesquisas orientadas, análise do problema e grupo de foco
- b) detalhar o ciclo de vida do produto e definir seus clientes: estruturas de desdobramento do ciclo de vida, *checklist* e matrizes de mapeamento;
- c) identificar os requisitos dos clientes do produto: questionários estruturados, entrevistas, *checklist*, diagrama de afinidades, diagrama de Mudge e *Quality Function Deployment* (QFD);

- d) definir especificações meta do produto: matriz de atributos, *checklist*, primeira matriz do QFD, análise paramétrica, análise matricial e diagrama de Mugde.

Conhecido também como Desdobramento da Função Qualidade ou Matriz da casa da Qualidade, o QFD é um método desenvolvido no Japão nos anos 70. Esta ferramenta relaciona as necessidades dos clientes com os requisitos de projeto de maneira eficaz. A estrutura típica está apresentada na Figura 4 (ROZENFELD et al., 2006).

Figura 4 – Estrutura típica do QFD



Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

A sequência de etapas apresentada na Matriz da Casa da Qualidade é designada como campos. Apresentam-se as atividades pertinentes a cada uma dessas fases defendidas por Rozenfeld et al. (2006).

- a) campo 1 (Requisitos dos clientes): correspondente ao que os clientes esperam que o produto seja;
- b) campo 2 (Importância): ao desenvolver as informações do campo um, pode-se determinar a importância de cada uma delas;
- c) campo 3 (Benchmark Competitivo): identifica-se a situação atual do produto no mercado, comparativo com a concorrência, e se os requisitos dos clientes estão sendo atendidos, caso não estejam, melhorias serão um ponto chave. Neste campo da matriz é possível elaborar colunas com informações de reclamações dos clientes para algum dos requisitos, importância para algum requisito que seja ponto chave para decisão de compra do produto, qualidade desejada, pontos fortes de venda, taxa de melhoria;
- d) campo 4 (Requisitos dos Produtos): representa a habilidade do produto para satisfazer os requisitos dos clientes;
- e) campo 5 (Matriz de Relacionamentos): é a correlação entre os requisitos dos clientes e os requisitos de produto;
- f) campo 6 (Quantificação dos Requisitos dos Produtos): para cada célula da matriz identifica-se se existe relação ou não, caso exista determina-se sua intensidade, quantificando os requisitos formar-se-á o conjunto de especificações para o produto;
- g) campo 7 (Matriz de Correlação): as interações entre os requisitos do produto formam o telhado da Casa da Qualidade e proporciona o entendimento sobre a natureza, efeitos e intensidade possível destes requisitos.

### **2.1.3 Projeto Conceitual**

Para Pahl (2005), o projeto conceitual baseia-se no esforço da busca ao princípio da solução, a fim de utilizar os métodos em aplicações práticas.

Conforme Rozenfeld et al. (2006), esta fase relaciona as atividades de projeto com:

- a) busca: pode se basear em produtos de concorrentes e similares, apresentados em livros, artigos, bases de dados, patentes, entre outros;
- b) criação: processo livre de restrições, porém guiado pelas necessidades, requisitos e especificações de produto;

c) representação: feita através de desenhos manuais ou computacionais, esquemas que permitam a visualização simplificada do produto;

d) seleção de soluções: implementada com base em métodos apropriados que se sustentam nas necessidades ou requisitos já definidos.

Assim como na etapa informacional, Rozenfeld et al. (2006) evidenciam 4 momentos de decisão, ou subfases, na etapa do projeto conceitual, apoiados por algumas ferramentas, conforme segue:

- a) modelar funcionalmente o produto: abstração orientada, modelagem funcional e matriz de decisão;
- b) desenvolver princípios de solução para as funções: abstração orientada e catálogos de solução;
- c) definir arquitetura para as alternativas de projeto: catálogo de solução, métodos de criatividade, matriz indicadora de módulos e matriz de interfaces;
- d) analisar sistemas, subsistemas e componentes (SSC): abstração orientada, modelagem funcional e matriz de decisão;
- e) selecionar concepção do produto: especificações-meta, necessidades dos clientes e matriz de decisão.

Na atividade de desenvolver os princípios de solução, inicia-se a passagem do abstrato para o concreto, para isso é possível fazer uso dos métodos chamados “métodos de criatividade”, classificados em três grupos: intuitivos, sistemáticos e orientados.

Para que seja possível modelar funcionalmente um produto, faz-se o uso de ferramentas, ao longo do trabalho será utilizada a estrutura de funções como forma de descrever as capacidades desejadas ou necessárias, que farão com que o produto desempenhe seus objetivos e especificações. De maneira geral este método é organizado a partir de uma função global e subdividido em funções posteriores, criando assim uma estrutura de produto organizada até a apresentação de suas funções finais.

O Método de criatividade Morfológico, inserido no grupo sistemático, e desenvolvido neste trabalho, consiste no desdobramento de um problema considerado complexo em etapas mais simplificadas. Inicialmente o problema é definido e dividido em parâmetros, buscam-se então formas alternativas para a solução dos parâmetros e em seguida definem-se suas possíveis combinações, adotando-se a mais favorável delas (ROZENFELD et al., 2006).

### 2.1.4 Projeto Detalhado

Desenvolver e projetar são atividades que criam pressupostos para a concretização de ideias da solução. O detalhamento do projeto final não é somente o detalhe específico de cada componente, mas simultaneamente poderão ser aplicadas: otimizações a respeito da forma do produto, materiais, superfícies, tolerâncias, etc. (PAHL, 2005).

O Projeto Detalhado dá sequência à fase anterior. Tem por objetivo completar as especificações do produto com o intuito de tornar possível seu desenvolvimento e manufatura.

Em comparação a fase anterior, que desdobra o produto sucessivamente em sistemas e subsistemas e depois em seus componentes, nesta etapa parte-se do produto final para chegar aos componentes. Nesta fase as atividades não ocorrem de forma sequencial, e sim paralela (ROZENFELD et al., 2006).

Ainda conforme os autores, o projeto detalhado pode ser refinado em três ciclos bem definidos, apresentados a baixo, que integram o relacionamento das desta fase:

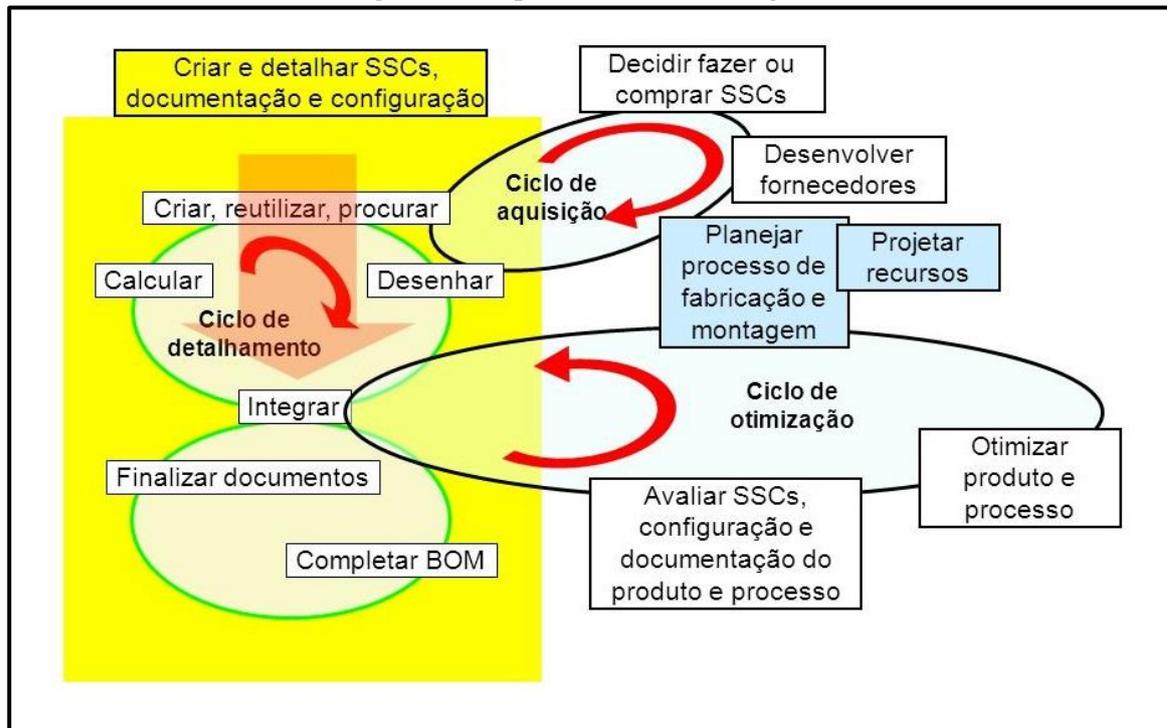
- a) ciclo de detalhamento: acontece quando se cria e detalham os integrando suas tarefas. Em sequência quando as SSCs estiverem definidas ativa-se o ciclo de aquisição, e quando o detalhamento das SSCs estiver adiantado e bem definido ativa-se o ciclo de otimização;
- b) ciclo de aquisição: utilizada durante o ciclo de detalhamento toda a vez que adquirir seja uma necessidade;
- c) ciclo de otimização: quando necessário é utilizado durante o ciclo de detalhamento como forma de melhoria.

Como forma de apresentar o processo, a Figura 5 exibe os ciclos e de que maneira estão interligados.

Para Rozenfeld et al. (2006), o campo mais amplo dentro do Projeto Detalhado é o ciclo de detalhamento, que é fragmentado nos seis estágios abaixo:

- a) criar, reutilizar, procurar e codificar SSCs;
- b) calcular e desenhar SSCs;
- c) especificar tolerâncias;
- d) integrar SSCs;
- e) finalizar desenhos e documentos;
- f) completar BOM (*Bill of material* ou estrutura do produto).

Figura 5 – Tipos de ciclos de Projeto Detalhado



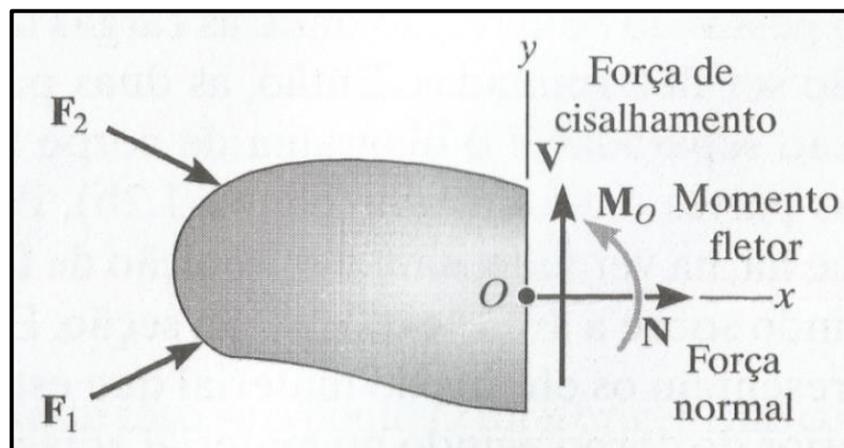
Fonte: adaptado de Rozenfeld et al. (2006)

## 2.2 ANÁLISE DE CARREGAMENTOS

Para a obtenção de cargas internas resultantes em elementos, deve-se fazer o uso de aplicações de estática baseado na resistência dos materiais, possibilitando determinar forças e momentos resultantes que atuam em um determinado corpo conforme apresenta a Figura 6.

A seguir são discutidos brevemente os tipos de carregamentos e as deformações associadas.

Figura 6 – Componente de forças atuantes em um corpo



Fonte: adaptado de Hibbeler (2010)

### 2.2.1 Carregamento em um corpo

Frequentemente elementos estruturais são longos e delgados, e estão expostas a cargas axiais, normalmente aplicadas as extremidades do componente. Deve-se adotar duas premissas de projeto: a barra deve permanecer reta antes e após da aplicação da carga e a força aplicada deverá se manter no eixo do centroide da seção transversal. Para a obtenção da tensão normal ( $\sigma$ ), divide-se a força normal interna (N) pela área da seção transversal (HIBBELER, 2010 e NORTON, 2004).

A tensão de cisalhamento puro ( $\tau$ ) ocorre no plano da área, quando forças externas de cisalhamento provocam o deslizamento de um dos segmentos do corpo sobre o outro sem que haja flexão presente. Podendo ser encontrada através da divisão da força de cisalhamento (V) pela área da seção transversal (NORTON, 2004).

### 2.2.2 Flexão

Quando existem solicitações externas, onde o efeito de aplicação tende a fletir o corpo ou o elemento estrutural em torno de um eixo que está no plano da área, denomina-se momento fletor. (HIBBELER, 2010).

A obtenção de momento fletor é feita através da Equação 1:

$$M = F \cdot l \quad (1)$$

onde:  $M$  é momento fletor;

$F$  é a força normal aplicada no ponto de trabalho;

$l$  é a distância do ponto de referência até o ponto de trabalho.

Em conjunto ao momento fletor, tem-se tensão normal de flexão, relacionando o momento encontrado na seção de estudo, juntamente com o momento de inércia da área da seção transversal de um elemento em relação ao plano neutro (que passa no baricentro da seção transversal de uma viga, por exemplo) (NOTON, 2004).

Expressada pela Equação 2:

$$\sigma = -\frac{M \cdot y}{I} \quad (2)$$

onde:  $\sigma$  é a tensão normal de flexão.

$M$  é o momento fletor;

$y$  é a distância do plano neutro até o ponto onde a tensão é calculada;

$I$  é o momento de inércia da área da seção transversal.

Além das tensões em elementos estruturais, para os modelos que exercem funções de vigas, deve-se levar em consideração suas deflexões. Se a deformação excede o limite de escoamento do material então o elemento escoará e deformará permanentemente, caso não exceda, deformações permanentes não devem ocorrer. (NORTON, 2004).

Previamente a determinação da inclinação ou deslocamento de um ponto de uma viga, projeta-se um rascunho da possível deformação do elemento, denominada linha elástica, que é o diagrama de deflexão do eixo longitudinal que passa pelo centroide da viga. Identifica-se uma importante relação entre o momento fletor ( $M$ ) e o raio de curvatura ( $r$ ) (HIBBELER, 2010).

A Equação 3 a seguir é aplicável a materiais de característica homogênea e comportam-se de maneira linear elástica:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E \cdot I} \quad (3)$$

onde:  $r$  é o raio de curvatura em um ponto específico sobre a linha elástica;

$M$  é o momento fletor interno, ponto onde  $\rho$  é determinado;

$E$  é o módulo de elasticidade do material;

$I$  é o momento de inércia da área da seção transversal.

### 2.2.3 Deformação axial

Entende-se por deformação axial o alongamento ou contração de um segmento específico, ou seja, a mudança de comprimento pela unidade de comprimento (HIBBELER, 2010 e NORTON, 2004).

Representada pela Equação 4:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4)$$

onde:  $\varepsilon$  é a deformação;

$l$  é o comprimento da medida sob a ação da força;

$l_0$  é a comprimento da medida inicial.

Segundo Norton (2004) pode-se ainda relacionar linearmente as tensões abordadas no subcapítulo 2.3.1 com as deformações, através da Lei de Hooke ao longo da região elástica, através da Equação 5:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

onde:  $E$  é o módulo de elasticidade do material;

$\sigma$  é a tensão de tração;

$\varepsilon$  é a deformação.

#### 2.2.4 Torção

Quando elementos são solicitados por um momento que tende a torcê-los em torno de seu eixo longitudinal, define-se como torque. Elementos de máquina e eixos que transmitem potência são comumente carregados com torque (HIBBELER, 2010 e NORTON, 2004). Calcula-se a tensão de cisalhamento pura devido ao toque em eixos de seção circular com material homogêneo e de comportamento linear elástico, utiliza-se a Equação 6:

$$\tau = \frac{T \cdot \rho}{J} \quad (6)$$

onde:  $T$  é o torque aplicado;

$\rho$  é a distância do centro da seção até o ponto de trabalho;

$J$  é o momento polar de inércia da seção transversal.

Para calcular o giro angular devido ao torque aplicado utiliza-se a Equação 7:

$$\theta = \frac{T \cdot l}{J \cdot G} \quad (7)$$

onde:  $T$  é o torque aplicado;

$l$  é o comprimento da barra/elemento;

$J$  é o momento polar de inércia da seção transversal.

$G$  é o módulo de elasticidade do material.

Tem-se o momento polar de inércia referente a uma seção transversal circular maciça através da Equação 8:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \quad (8)$$

onde:  $d$  é o diâmetro da seção;

## 2.3 ELEMENTOS DE MÁQUINA EM PROJETOS MECÂNICOS

### 2.3.1 Correias e polias

Correias são utilizadas como elementos de transmissão e transporte de potência. Tem como ponto positivo o uso em longas distâncias de eixo, e frequentemente são utilizadas na substituição de engrenagens, eixo, mancais, etc. em sistemas mecânicos reduzindo seu custo (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Uma das divisões de correias é modelo V, largamente utilizada em sistemas de transmissões industriais e veiculares. O formato deste modelo propicia uma boa aderência entre correia e polia, possibilitando elevado torque no conjunto (MOTT, 2015).

A velocidade linear ( $v_b$ ) da linha de passo pode ser calculada através da Equação 9:

$$v_b = R_1 \cdot \omega_1 = R_2 \cdot \omega_2 \quad (9)$$

onde:  $R_1$  é o raio da polia menor;

$\omega_1$  é a velocidade angular na polia menor;

$R_2$  é o raio da polia maior;

$\omega_2$  é a velocidade angular na polia maior.

Os ângulos de contato das polias menor e maior, com a correia, são dados pelas Equações 10 e 11 respectivamente:

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \cdot \text{sen}^{-1} \cdot \frac{(D_2 - D_1)}{2 \cdot C} \quad (10)$$

$$\theta_2 = 180^\circ + 2 \cdot \text{sen}^{-1} \cdot \frac{(D_2 - D_1)}{2 \cdot C} \quad (11)$$

onde:  $D_1$  é o diâmetro da polia menor;  
 $D_2$  é diâmetro da polia maior;  
 $C$  é a distância entre centros das polias.

### 2.3.2 Engrenagens

Possuem a função de transmitir movimento e potência de um eixo para outro. Uma vez existindo acoplamento de uma engrenagem a outra, torque é fornecido, sendo assim pode-se desenvolver relações de trabalho alternando velocidades de engrenagem motora e movida. Em um sistema mecânico comumente nomeia-se pinhão a engrenagem menor e simplesmente engrenagem a maior (MOTT, 2015).

Conforme Shigley, Mischke e Budynas (2005), adotando como modelo a engrenagem cilíndrica de dentes retos, têm-se as seguintes Equações a serem validadas como ponto de partida:

$$P_d = \frac{N}{d} \quad (12)$$

$$m = \frac{d}{N} \quad (13)$$

$$p = \frac{\pi \cdot d}{N} \quad (14)$$

onde:  $P_d$  é o passo diametral;  
 $N$  é o número de dentes;  
 $d$  é o diâmetro primitivo;  
 $m$  é o módulo;  
 $p$  é o passo circular.

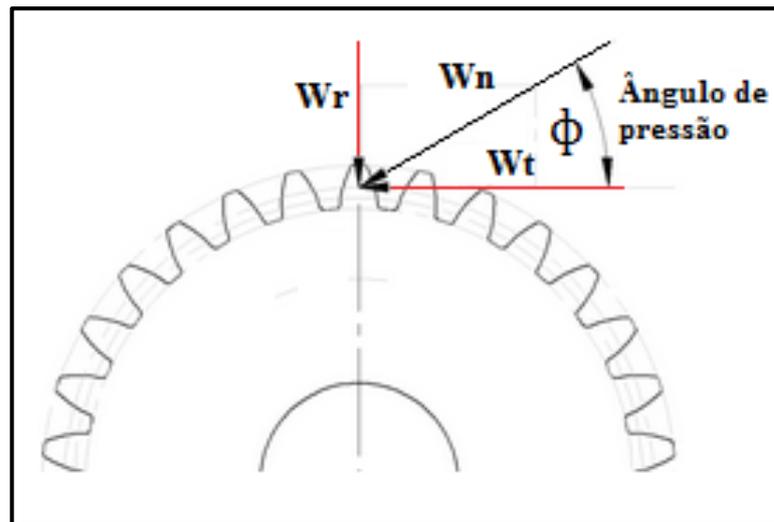
A relação entre número de dentes e rotação é dada pela Equação 15:

$$\frac{n_P}{n_G} = \frac{N_G}{N_P} \quad (15)$$

onde:  $n_p$  é a rotação do pinhão;  
 $N_p$  é o número de dentes do pinhão;  
 $n_G$  é a rotação da engrenagem;  
 $N_G$  é o número de dentes da engrenagem.

Para Mott (2015), fazendo a relação de aplicação de eixos com engrenagens de dentes retos, tem-se torque e forças associadas, conforme apresenta a Figura 7.

Figura 7 – Força nos dentes de uma engrenagem



Fonte: adaptado de Mott (2015)

Para obter a força tangencial aplicada no dente utiliza-se a Equação 16:

$$W_t = \frac{T}{r} \quad (16)$$

onde:  $T$  é o torque na engrenagem;  
 $r$  é o raio do pinhão.

Para obter a força radial aplicada ao dente da engrenagem utiliza-se a Equação 17:

$$W_r = W_t \cdot \tan \phi \quad (17)$$

onde:  $W_t$  é a força tangencial;  
 $\phi$  é o ângulo de pressão.

### 2.3.3 Eixos

Componentes rotativos normalmente de seção transversal circular, empregado para transmitir potência ou movimento. Empregado nos sistemas mecânicos como a ligação entre elementos de máquinas como: engrenagens, polias, rodas, entre outros (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Tendo conhecimento do sistema de eixo de engrenagens, é possível encontrar o torque pela seguinte equação:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (18)$$

onde:  $P$  é a potência sendo transmitida;  
 $\omega$  é a velocidade angular.

### 2.3.4 Chavetas

Chavetas são elementos de máquinas desmontáveis, situada na interface entre eixos e elementos rotantes, a fim de transmitir torque (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Este componente é instalado através de um sulco axial feito o eixo denominado assento. Outro sulco similar é feito no elemento transmissor denominado de assento. Sendo o modelo mais comum utilizado, a chaveta de seção quadrada ou retangular, pode ser selecionada através do diâmetro do eixo utilizado em uma dada aplicação, desta forma a literatura fornece modelos padronizados dimensionando-se este elemento através de sua Largura ( $W$ ) e sua altura ( $h$ ). (MOTT, 2015).

É possível obter o comprimento mínimo da chaveta exigida para cisalhamento, através das seguintes equações, iniciando pela tensão de cisalhamento ( $t_d$ ), tem-se:

$$t_d = \frac{0,5 \cdot s_y}{N} \quad (19)$$

onde:  $s_y$  é a tensão de escoamento do material da chaveta;  
 $N$  é o fator de projeto.

$$L_{min} = \frac{2 \cdot T}{t_d \cdot D \cdot e} \quad (20)$$

onde:  $T$  é o torque aplicado;  
 $D$  é o diâmetro do eixo;  
 $e$  é a largura da chaveta.

Para a obtenção do comprimento mínimo da chaveta para situação de compressão. Se o material da chaveta tiver resistência menor que o material do eixo, iniciando pela tensão de cisalhamento para compressão ( $\sigma_d$ ), tem-se:

$$\sigma_d = \frac{s_y}{N} \quad (21)$$

onde:  $s_y$  é a tensão de escoamento do material da chaveta;  
 $N$  é o fator de segurança de projeto.

$$L_{min} = \frac{4 \cdot T}{\sigma_d \cdot D \cdot H} \quad (22)$$

Se o material da chaveta tiver resistência maior que o material do eixo:

$$L_{min} = \frac{4 \cdot T \cdot N}{D \cdot e \cdot s_y} \quad (23)$$

onde:  $T$  é o torque aplicado;  
 $D$  é o diâmetro do eixo;  
 $H$  é a altura da chaveta;  
 $e$  é a largura da chaveta.

### 2.3.5 Mancal de elementos rolantes

Este elemento é utilizado em locais onde a carga principal é transferida por meio de elementos rolantes, em geral são os eixos que promovem esta transferência. Mancais são projetados para receber cargas do tipo radiais puras, axiais ou a combinação entre estas. No geral são divididos em duas classes de esferas ou de rolos (SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

Pode-se obter a distribuição de vida típica de um mancal de elementos rolantes de esferas através da Equação 24:

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (24)$$

onde:  $L$  é a vida de fadiga [milhões de ciclos];

$C$  carga dinâmica básica de classificação (para um mancal específico que é definido pelo fabricante);

$P$  é a carga constante aplicada;

Em uma dada situação, onde se tem a combinação de cargas axial e radial aplicadas ao mancal, deve-se calcular uma carga equivalente ( $P$ ), a fim de ser utilizada na Equação 24, conforme demonstra a Equação 25:

$$P = X \cdot V \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (25)$$

onde:  $F_r$  é a carga radial constante aplicada;

$F_a$  é a carga axial constante aplicada;

$V$  é o fator de rotação;

$X$  é a fator radial;

$Y$  é o fator axial;

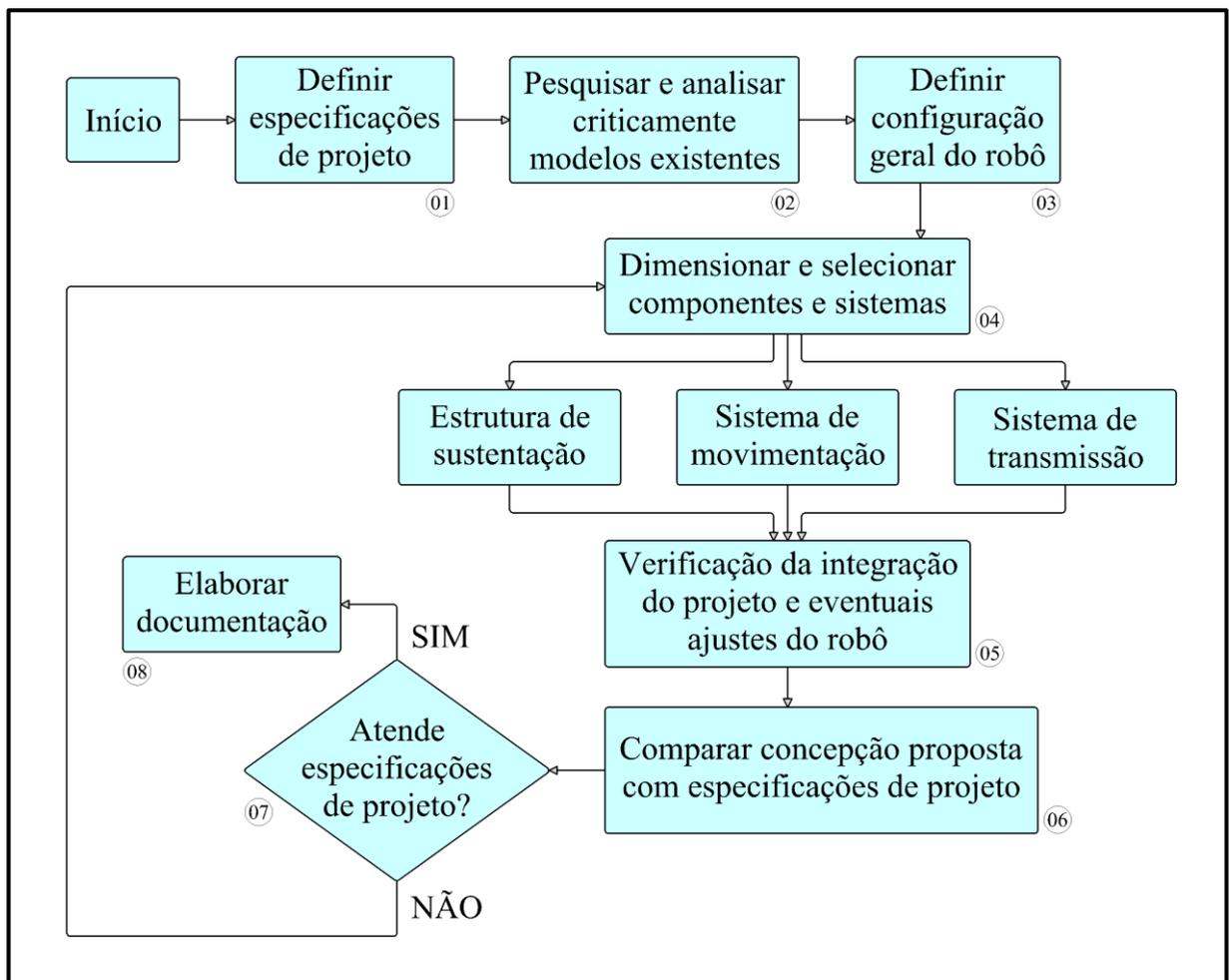
### 3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo é apresentado o modo como foram desenvolvidos os sistemas mecânicos de um robô, projetado para uso hospitalar. Inicialmente foi feito um estudo de mercado apresentando modelos existentes que poderiam contribuir par ao desenvolvimento deste projeto. Posteriormente são desenvolvidas as etapas de PDP baseadas no método defendido por Rozenfeld et al. (2006), para possibilitar as etapas de dimensionamento dos sistemas mecânicos e desenvolvimento da documentação gráfica pertinente a este projeto.

#### 3.1 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO

O Fluxograma da Figura 8 apresenta as etapas de aplicação em ordem cronológica que viabilizaram o desenvolvimento deste projeto.

Figura 8 – Fluxograma de desenvolvimento



As etapas de 1 a 3 resultaram do processo inicial do PDP, conforme apresentado no Capítulo 2. Na etapa 4 foi desenvolvido o modelo por completo seguido de simulações, foram utilizados para o modelamento do produto, softwares CAD (*computer aided design*), ou projeto assistido por computador, especificamente AutoCAD Mecânico e SolidWorks. Juntamente com a etapa de modelamento, foram analisadas as solicitações de cada sistema mecânico, analiticamente e numericamente, conforme cálculos apresentados no Capítulo 2 através dos softwares citados, tendo assim suporte para o desenvolvimento e análise dos elementos utilizados. Para a seleção de possíveis componentes e materiais foram utilizados catálogos de fabricantes.

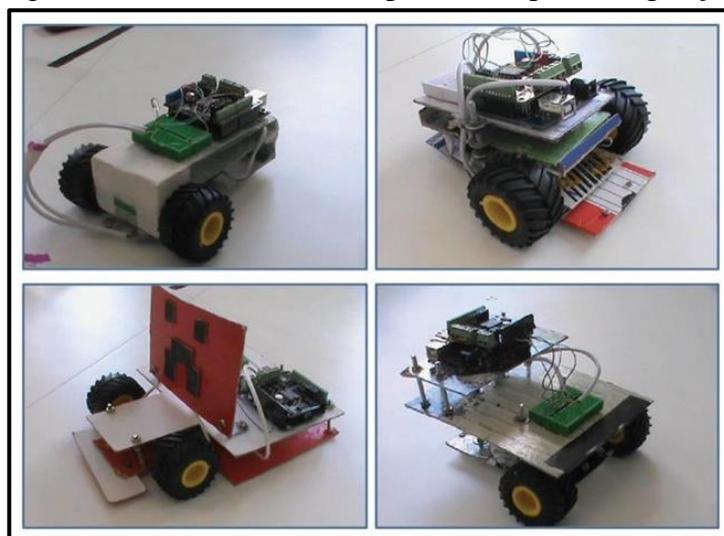
Posteriormente para o detalhamento final, apresenta-se o projeto e as documentações, possibilitando utilizá-los em um possível processo produtivo, garantindo a manufatura.

### 3.2 APRESENTAÇÃO DE MODELOS SIMILARES

Apresentam-se trabalhos e propostas relacionadas ao desenvolvimento e a utilização de robôs que auxiliem pessoas, seja em ambientes hospitalares, de ensino, manufatura ou até mesmo como forma de evolução. O intuito é absorver de cada um deles os pontos mais favoráveis contribuindo para a criação de um novo projeto, especialmente no que tange aos sistemas construtivos como: materiais, elementos mecânicos e tipos de estruturas.

Inserir atividades associadas à robótica nas escolas é eficiente no quesito de despertar o interesse e motivação dos alunos. A Figura 9 apresenta atividades executadas por alunos.

Figura 9 – Robôs construídos por alunos para competição

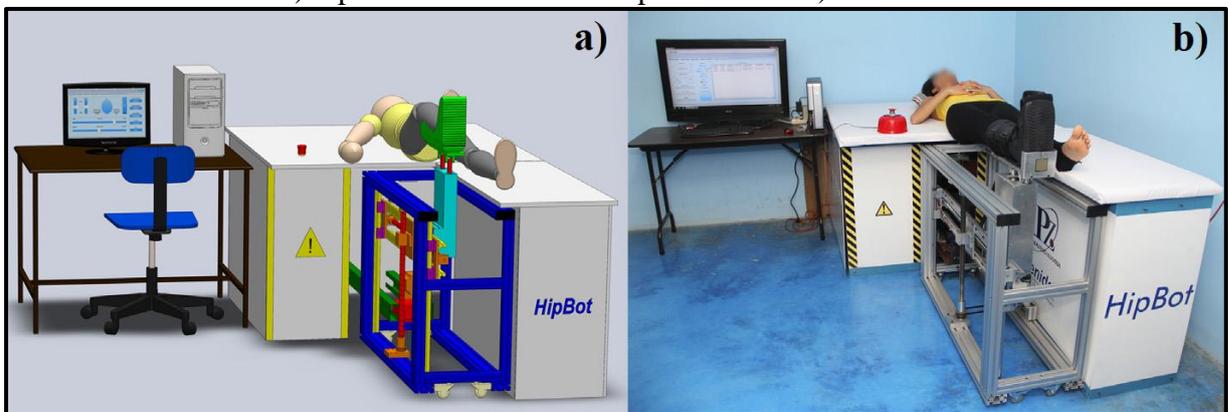


Fonte: adaptado de Lopes et al. (2015)

A motivação do aluno é uma variável primordial do processo ensino/aprendizagem. As atividades podem ser utilizadas de uma forma multidisciplinar, mesclando as metodologias, assim proporcionando um maior convívio entre os alunos e propiciando conhecimento e contribuindo na didática.

Justificando o uso de da robótica em ambientes hospitalares, o modelo a seguir diz respeito a um robô terapêutico para reabilitação do quadril, possibilitando que pacientes executem movimentos com menor esforço ao longo do tratamento. Estrutura considerada mais simples de design mecatrônico ao invés de um complexo robô. O modelo possui a estrutura desenvolvida em perfil de alumínio, juntas em aço e fixações internas em parafusos de chumbo, satisfazendo requisitos de força torque, resultando em uma estrutura leve. Faz uso de atuadores que descrevem trajetórias lineares e rotativas, proporcionando estabilidade e robustez. Um micro controlador é utilizado para converter dados analógicos em digitais provindos de sensores instalados no equipamento (GUZMÁN-VALDIVIA et al., 2015). A Figura 10 apresenta o modelo.

Figura 10 – Modelo de robô para reabilitação do quadril onde  
a) representa o modelo computacional e b) modelo real



Fonte: adaptado de Guzmán-valdivia et al. (2015)

Controlar e reduzir custos aumentando a eficiência tornou-se uma procura contínua em hospitais. Com a intensificação das despesas em saúde, seja na área pública ou privada é visivelmente necessário que se analisem métodos e empreguem tecnologias propícias para ampliar e aprimorar a qualidade da assistência. Uma revolução tecnológica é o robô QC Bot, produzido em Boston (EUA). Refere-se a uma plataforma robótica e multifuncional. Sua aplicabilidade consiste em numerosas tarefas, a começar como monitoramento de segurança, entrega da farmácia, entrega de refeições entre outras. O instrumento possui inteligência artificial e um sistema de navegação de forma autônoma. Viabiliza o acompanhamento e a

documentação do fluxo logístico pela tela de toque e o software, no qual o paciente também o utiliza para funções como check-in, localização, registro e tele presença clínica (PINOCHET; LOPES; SILVA, 2014). A Figura 11 apresenta o modelo.

Figura 11 – Modelo de robô para logística hospitalar



Fonte: adaptado de Pinochet, Lopes e Silva (2014)

O Robô Móvel Agrícola (Figura 12) foi desenvolvido no Brasil para testar diferentes sistemas de sensores e ferramentas no campo, sendo capaz de trabalhar em condições adversas.

Figura 12 – Modelo de robô para uso agrícola



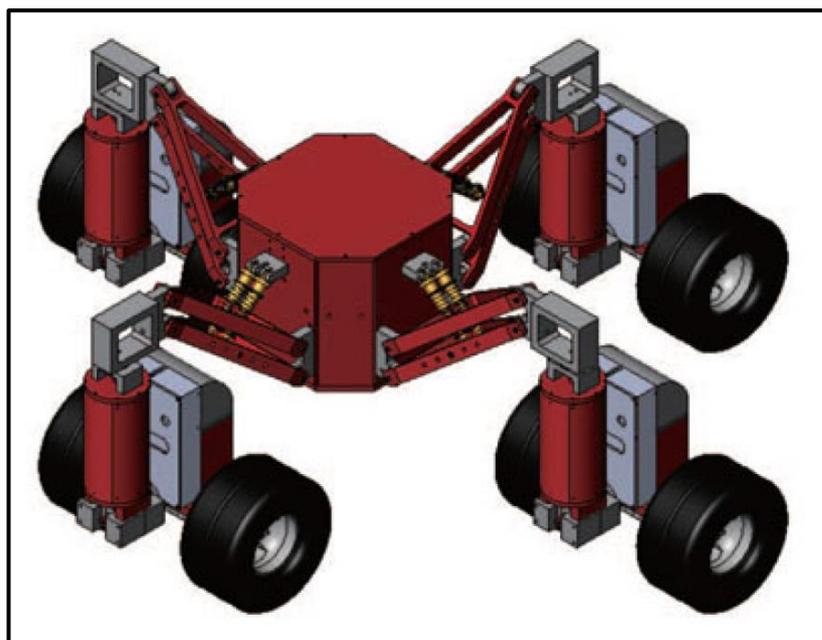
Fonte: adaptado de Tabile et al. (2011)

A estrutura mecânica do Robô foi detalhada empregando o sistema virtual de metodologia de prototipagem, foi utilizado o Software CAD e CAE. O sistema foi projetado em módulos independentes (armação lateral e superior). Neste projeto, foi adotado um sistema de quatro rodas para aumentar a capacidade do veículo para movimentação em condições adversas e tração independente em cada roda.

O sistema foi dimensionado com tração total. Entre os sistemas de direção encontrados, há direção diferencial, direção articulada e direção de roda. Motores elétricos foram escolhidos porque são fáceis de controlar. Como fonte de energia foi utilizada baterias. Os itens mais pesados, como baterias e sistemas de propulsão e direção, ficaram pelo menos um metro do solo, que contribuiu para reduzir o centro de gravidade da estrutura, aumentando assim a sua estabilidade. Para fornecer a direção das rodas dianteiras, dois motores de 48 V com 150 W foram usados. Através desse projeto confirmou-se que a metodologia aplicada utilizada foi eficaz. Ensaios preliminares determinaram que a estrutura atingiu os requisitos originalmente propostos (TABILE et al., 2011).

O robô móvel omnidirecional (Figura 13) foi desenvolvido para alta mobilidade em terrenos acidentados. O robô constitui-se em um corpo principal com quatro conjuntos de módulos de mobilidade, chamado de rodízio ativo (ASOC). O módulo ASOC tem rodas duplas independentes que produzem conversões planares arbitrária e velocidade, permitindo que o robô atinja seu movimento omnidirecional.

Figura 13 – Modelo de robô para terrenos acidentados



Fonte: adaptado de Ishigami et al. (2014)

Cada módulo está conectado ao corpo principal através de uma ligação paralela com amortecedores, permitindo que o robô se adapte a terrenos irregulares. Um robô omnidirecional pode executar inúmeras manobras que não podem ser alcançadas pelo típico Ackermann. O ASOC é um módulo robótico autossustentável, constituído de uma fonte de alimentação, dois atuadores, um micro controlador, um dispositivo (XBee) e um driver de motor. O eixo de rotação permite que o par de rodas seja isolado em superfícies de terreno inclinado ou esburacado. A avaliação experimental do desempenho de mobilidade reforçou que o robô possui uma configuração invariável e possivelmente mobilidade omnidirecional independente da velocidade (ISHIGAMI et al., 2014).

### 3.2.1 Contribuição de modelos similares

Apresenta-se no Quadro 3, um resumo de aplicações adotadas em projeto similares no campo da robótica. Estes detalhes extraídos de modelos de robôs existentes poderão se tornar possíveis soluções a serem implantadas e utilizadas neste novo projeto.

Quadro 3 – Possíveis soluções de projetos existentes

<b>Projeto Existente</b>	<b>Contribuição</b>	<b>Autor</b>
Robôs construídos por alunos para competição	Modelo com duas rodas tracionadas e uma boba	Lopes et al. (2015)
	Mecânica controlada por sistema eletrônico	
Robô para reabilitação do quadril	Estrutura confeccionada em perfilados de alumínio	Guzmán-valdivia et al. (2015)
Robô para logística hospitalar	Interface por LCD, entre usuário e robô	Pinochet, Lopes e Silva (2014)
	Possui controle por software	
	Design atrativo	
Robô para uso agrícola	Estrutura confeccionada em tubos	Tabile et al. (2011)
	Tração independente em cada uma das rodas do modelo	
Robô para terrenos acidentados	Modelo faz uso de rodas duplas, melhorando movimentação	Ishigami et al. (2014)
	Possui sistema de tração controlado por motor e driver, sistema de amortecimentos fazendo uso de atuadores, tudo isso alimentado por baterias	

Fonte: o autor (2019)

## 4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Este capítulo aborda o desenvolvimento prático aplicado ao longo do projeto. As necessidades do projeto deram suporte ao início do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP), fazendo o uso de ferramentas adequadas e pertinentes a cada fase.

### 4.1 PROJETO INFORMACIONAL

#### 4.1.1 Especificações de Projeto

O Quadro 4 apresenta as necessidades dos diversos clientes e os respectivos requisitos associados. Elaborados juntamente com os profissionais das áreas de psicologia e engenharia elétrica. Os clientes por sua vez são considerados: operador final, indivíduos destinados à fabricação e manutenção do equipamento.

Quadro 4 – Especificações iniciais de Projeto

<b>Necessidades dos Clientes</b>	<b>Requisitos de Projeto</b>
Movimentação para frente e trás e rotação com estabilidade	Força máxima lateral para não tombamento
	Rotação e Translação
Peso do conjunto	Peso Máximo
Velocidade de deslocamento adequada	Velocidade limite
Garantir integridade física dos envolvidos	Possuir proteções adequadas e isolamentos
Alimentação por baterias	Capacidade da Bateria
Autonomia adequada	Tempo de duração da bateria
Custo adequado (baixo)	Custo máximo
Altura adequada	Altura máxima
Não exceder espaço físico determinado	Área projetada em planta
Não deteriorar no ambiente de uso	Materiais e acabamentos superficiais adequados, considerando finalidade e ambiente hospitalar
Possibilidade de upgrade de novas funções	Volume interno
	Força máxima lateral para não tombamento
Manutenção simples	Prever acesso fácil em todo o equipamento
	Diminuir necessidade de ferramentas diferentes para executar regulagens
	Custo de componentes de fixação padronizados
	Menor número de componentes possível

Fonte: o autor (2019)

As especificações identificam as necessidades de um suposto cliente/usuário, desempenhando o papel de parâmetro para expressar as características do produto.

Essas mesmas necessidades foram vinculadas ao(s) seu(s) respectivo(s) requisito(s) de projeto, para que o desenvolvimento do mesmo se torne possível de ser executado.

Na busca pelo ordenamento dos requisitos de projeto, de forma a apresentá-los em ordem crescente de importância, criou-se a Matriz da Casa da Qualidade (QFD) conforme apresenta a Figura 14.

O desdobramento da matriz foi gerado da seguinte forma:

- a) as necessidades dos clientes foram divididas em três grupos, posteriormente atribuiu-se um grau de importância para cada necessidade de forma intuitiva com base no projeto, podendo variar de 1 até 10;
- b) associou-se as necessidades dos clientes com os requisitos de projeto por meio de códigos, utilizando letras de “A” a “L”;
- c) a intensidade de relacionamento entre necessidades dos clientes com requisitos de projeto, se deu através das notas abaixo, atribuídas de forma analítica:
  - 0 representa nenhum relacionamento;
  - 1 representa muito pouco relacionamento;
  - 3 representa pouco relacionamento;
  - 9 representa muito relacionamento.
- d) procedeu-se com o somatório das multiplicações entre notas e grau de importância, resultando em valores possíveis de serem comparados, a fim de definir quais foram os requisitos mais importantes a serem levados em consideração para o sequenciamento do projeto. Nesta etapa valores numéricos foram transformados também em porcentagens para facilitar a comparação;
- e) para finalizar o processo de criação da matriz, estipularam-se valores meta para cada requisito de projeto. Os valores meta podem ser considerados descrições ou valores numéricos dependendo de cada caso. Para os últimos valores meta com pontuação de em torno de 4%, por serem destinados à parte eletrônica do projeto, os mesmos não foram levados em consideração para o desenvolvimento do produto.

Figura 14 – QFD (Matriz Casa da Qualidade)

		A	A/K	I	C	B	H	K	G	J	L	L	L	D	E	F
		<b>Requisitos de Projeto</b>														
	<b>Grau de Importância</b>	10	9	3	3	3	3	1	3	0	0	0	0	0	0	0
	<b>Necessidades dos Clientes</b>															
	<b>Código</b>	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	L	L	F
	Movimentação para frente, para trás e rotação com estabilidade	9	3	1	1	1	1	1	1	3	0	1	1	3	0	0
	Peso do conjunto	10	9	1	3	3	3	1	0	1	0	1	0	0	0	0
	Velocidade de deslocamento adequada	10	9	1	3	3	3	1	0	1	0	1	0	0	0	0
	Garantir integridade física dos envolvidos	8	3	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	9
	Alimentação por baterias	7	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	Autonomia adequada	9	3	0	0	1	1	0	9	3	9	1	9	3	0	0
	Custo adequado (baixo)	8	1	9	1	1	9	3	0	0	0	1	1	0	0	0
	Altura adequada	8	1	3	0	1	3	9	0	0	0	0	1	0	0	0
	Não exceder espaço físico determinado	10	0	0	0	0	0	0	3	9	1	0	1	0	0	0
	Não deteriorar no ambiente de uso	7	1	9	3	3	1	9	3	1	1	9	3	0	3	0
	Possibilidade de upgrade de novas funções	8	3	0	0	1	0	1	0	1	9	9	3	0	0	0
	Manutenção simples	356	10,3%	286	256	238	211	196	189	187	170	169	167	162	156	135
		10,5%	8,4%	8,4%	7,6%	7,0%	6,2%	5,8%	5,6%	5,5%	5,0%	5,0%	4,9%	4,8%	4,6%	4,0%
		<b>Valor Meta</b>														
		Min. de 30 minutos com todos os sistemas operando														
		Alimentar todos os sistemas elétricos e eletrônicos														
		Não expor componentes internos														
		Máx. 2 componentes principais repetidos														
		03 Acessos (base, corpo e topo)														
		Máx. de 02 tipos ferramentas para possíveis regulagens														
		Máx. 10% do custo meta (R\$ 150,00)														
		Não apresentar oxidação em peças metálicas														
		R\$ 1.500,00														
		Min. de 0,01 m³														
		1.200 mm														
		23 kg														
		0,8 m/s														
		0,6 x 0,6 m = 0,36 m²														
		50 N na maior altura														
		Girar para os lados e andar para frente para trás guiado linearmente														

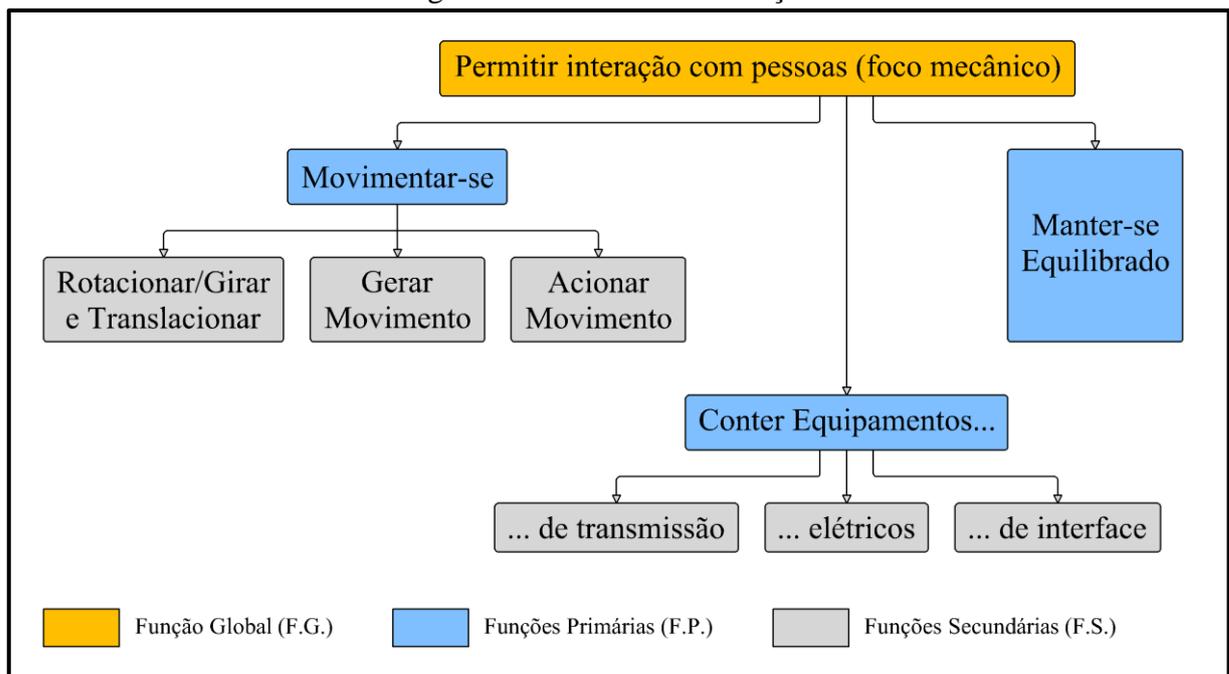
Fonte: o autor (2019)

## 4.2 PROJETO CONCEITUAL

Partindo do pressuposto que a esta etapa baseia-se no esforço da busca ao princípio de solução, foram adotados métodos de efeito comparativo a fim de optar pela melhor escolha na sequência do projeto.

Como ponto de partida, elaborou-se uma estrutura de funções, possibilitando compor as atribuições do produto de forma organizada. Construído conforme apresenta a Figura 15, o fluxograma inicia-se com uma Função Global, sendo posteriormente subdividida em funções, estas serão responsáveis por apontar e dar as diretrizes para se criar os princípios de solução da etapa posterior. De maneira geral cada função foi relacionada com um ou mais princípios, podendo ser escolhido intuitivamente desde que atenda a solicitação.

Figura 15 – Estrutura de Funções



Fonte: o autor (2019)

A Matriz Morfológica (Quadro 5) é baseada em requisitos técnicos construtivos e custos de projeto, fazendo comparativos do que é mais viável, ou seja, produção dos próprios produtos e acessórios ou aquisição de itens comprados.

Os princípios de solução apontados na matriz seguem o Método alternativo de seleção, onde as opções e alternativas de concepção são avaliadas em relação aos requisitos técnicos contidos no QFD.

Quadro 5 – Matriz Morfológica

	Princípio de Solução 01	Princípio de Solução 02	Princípio de Solução 03	Princípio de Solução 04	Princípio de Solução 05	Princípio de Solução 06	Princípio de Solução 07	Princípio de Solução 08
Funções	Rotacionar/Girar e Translacionar	Duas rodas de tração independentes + duas rodas bobas	Duas esteiras independentes	Uma roda de tração direcional central + quatro rodas bobas				
	Gerar Movimento	Motor Elétrico de Passo	Motor Elétrico convencional					
	Acionar Movimento	2 motores independentes	1 motor + Diferencial	1 motor + Diferencial + 1 motor para barra de direção	2 motores independentes + Transmissão	2 motores independentes + 1 motor para barra de direção + Transmissão	1 motor + Diferencial + Transmissão	1 motor independente + Transmissão
... de transmissão	Situados juntos em um mesmo nível	Situado a nível baixo	Situado a nível médio	Situado a nível alto				
		Situado a nível baixo	Situado a nível médio	Situado a nível alto				
		Situado a nível baixo	Situado a nível médio	Situado a nível alto				
... de interface	Centro de Gravidade (C.G.) baixo	Mínimo de 4 pontos de apoio	Centro de Gravidade (C.G.) baixo e mínimo de 4 pontos de apoio					
Movimentar-se	Permitir interação com pessoas (foco mecânico)	Mater-se equilibrado	Centro de Gravidade (C.G.) baixo					

Fonte: o autor (2019)

A partir da Matriz Morfológica, foram definidas as propostas de projeto, exibidas conforme Quadro 6. As três primeiras funções relacionadas à movimentação distinguiram as propostas, as demais funções se mantiveram praticamente uniformes.

Quadro 6 – Propostas Seleccionadas

<b>Proposta 1</b>	<b>Proposta 2</b>	<b>Proposta 3</b>	<b>Proposta 4</b>
Duas rodas de tração independentes + duas rodas bobas	Duas rodas de tração independentes + duas rodas direcionais	Duas esteiras independentes	Uma roda de tração direcional central + quatro rodas bobas
Motor Elétrico de Passo	Motor Elétrico convencional	Motor Elétrico de Passo	Motor Elétrico convencional
2 motores independentes + Transmissão	1 motor + Diferencial + 1 motor para barra de direção	2 motores independentes + Transmissão	1 motor independente + Transmissão
Situado a nível baixo	Situado a nível baixo	Situado a nível baixo	Situado a nível baixo
Situado a nível médio	Situado a nível médio	Situado a nível médio	Situado a nível médio
Situado a nível alto	Situado a nível alto	Situado a nível alto	Situado a nível alto
Centro de Gravidade (C.G.) baixo e mínimo de 4 pontos de apoio	Centro de Gravidade (C.G.) baixo e mínimo de 4 pontos de apoio	Centro de Gravidade (C.G.) baixo	Centro de Gravidade (C.G.) baixo e mínimo de 4 pontos de apoio

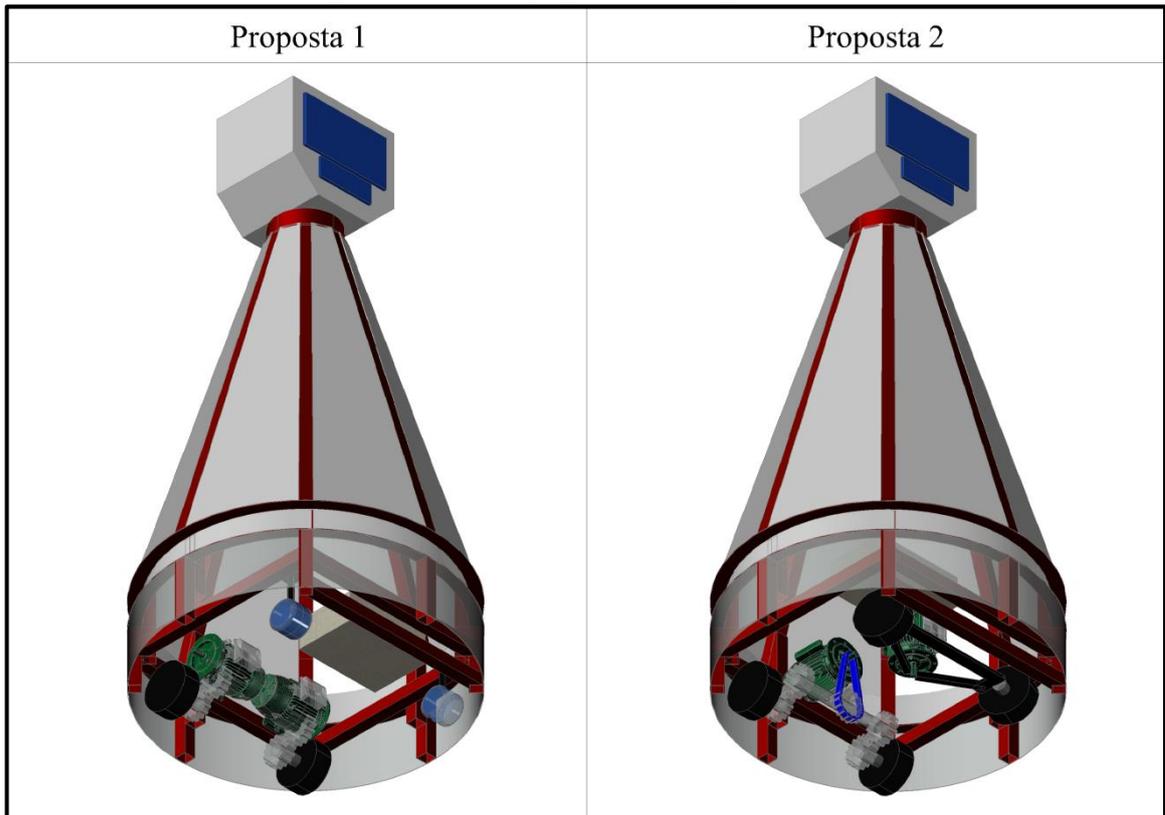
Fonte: o autor (2019)

Tomando como referência o PDP até o momento, com base em necessidades dos clientes e seus respectivos requisitos é possível ter uma ideia primária e sugerir um esboço do produto condizente com cada uma das quatro propostas.

As Figuras 16 e 17 ilustram as quatro propostas separadamente com seus respectivos detalhes, onde os elementos mais importantes estão dispostos em suas bases, sendo eles os responsáveis pela movimentação, estabilidade, formas de propulsão e elementos mecânicos responsáveis pela transmissão e rodagem.

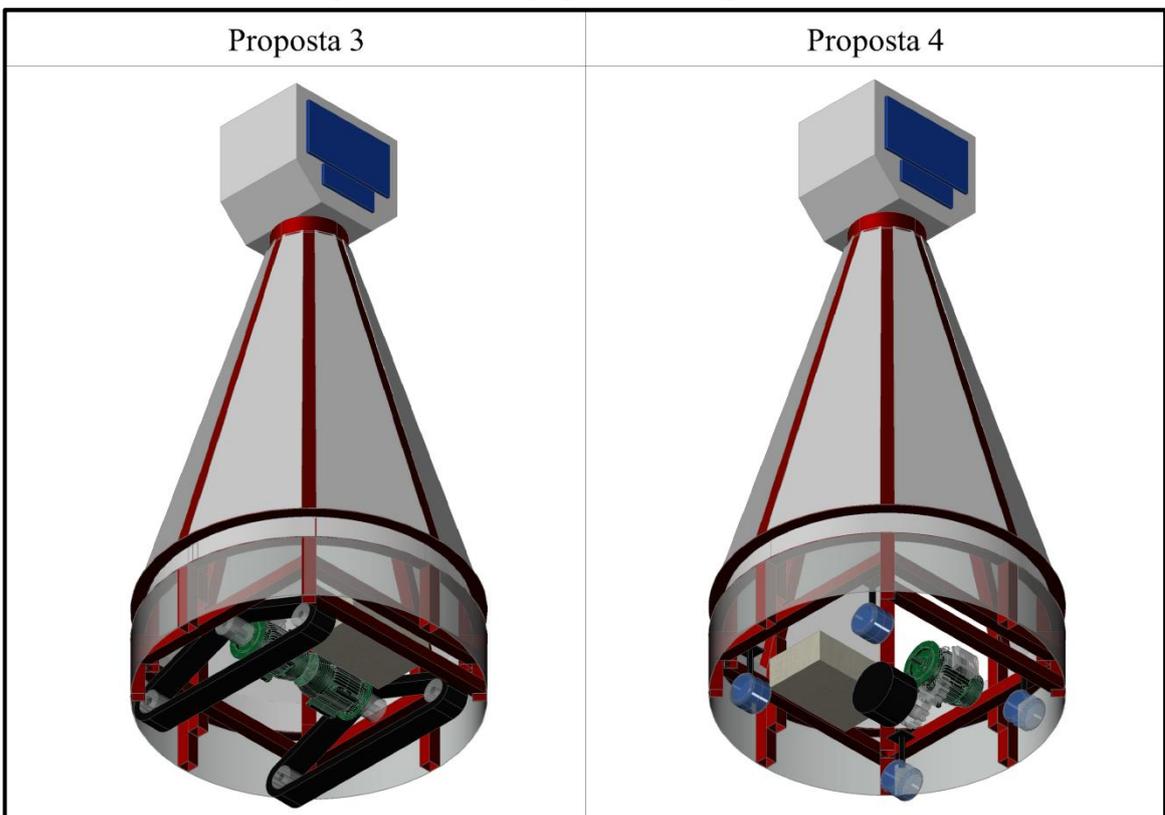
Com o desenvolvimento das etapas posteriores, onde serão obtidos detalhes construtivos com maior precisão, o projeto selecionado sofrerá revisões nas suas diversas partes.

Figura 16 – Esboço primário Proposta 1 e 2



Fonte: o autor (2019)

Figura 17 – Esboço primário Proposta 3 e 4



Fonte: o autor (2019)

A Matriz de Decisão, apresentada pelo Quadro 7, integra de forma quantitativa a relação entre as propostas sugeridas com os requisitos dos clientes, atribuindo conceitos (1, 3 ou 5), de maneira que as melhores relações recebam os maiores valores. Ao final pode-se obter o somatório de conceitos com importância relativa, resultando qual será a proposta que melhor atende ao projeto. Nesse caso a proposta selecionada foi a de pontuação 4,55.

Quadro 7 – Matriz de Decisão

Cód.	Requisitos de Projeto	Import. Relativa	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3	Proposta 4
A	Rotação e translação	10,51%	5	5	3	1
	Força máxima lateral para não tombamento	10,33%	5	5	5	5
B	Área projetada em planta	8,44%	5	5	5	5
C	Velocidade limite	7,56%	5	3	5	3
D	Peso máximo	7,02%	3	3	5	3
E	Altura máxima	6,23%	5	5	5	5
F	Volume interno	5,79%	5	5	3	5
G	Custo máximo	5,58%	3	5	3	3
H	Materiais e acabamentos superficiais adequados	5,52%	5	5	5	5
I	Custo de componentes de fixação padronizados	5,02%	3	1	3	3
J	Diminuir necessidade de ferramentas diferentes para executar regulagens	4,99%	3	1	5	1
K	Prever acesso fácil em todo o equipamento	4,93%	5	5	5	5
L	Menor número de componentes possível	4,78%	5	3	5	3
	Possuir proteções adequadas e isolamentos	4,72%	5	5	5	5
	Capacidade da bateria	4,60%	5	1	5	5
	Tempo de duração da bateria	3,98%	5	5	5	5
		100,0%	<b>4,55</b>	<b>4,03</b>	<b>4,46</b>	<b>3,78</b>
			1ª Opção	3ª Opção	2ª Opção	4ª Opção

Fonte: o autor (2019)

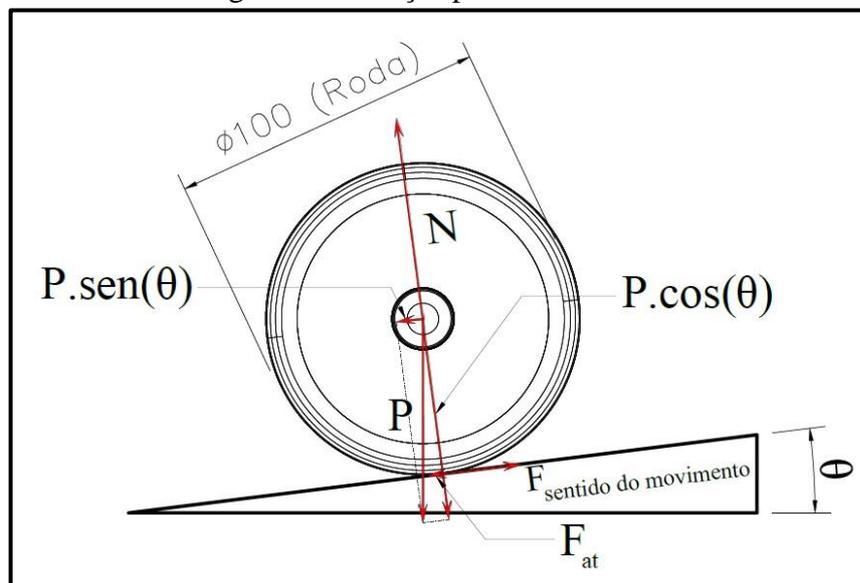
Apesar da pontuação praticamente igual para as propostas 1 e 3, optou-se pela 1 por questões de padronização de componentes comerciais.

#### 4.2.1 Dimensionamento da Transmissão

Para que seja possível dimensionar uma transmissão para o produto, devem ser feitas algumas considerações. A Figura 18 apresenta as forças atuantes em uma das rodas do robô (serão duas rodas idênticas responsáveis pela tração do equipamento). Através do cálculo da força de atrito, pode-se definir um parâmetro para a força requerida no sistema.

Dessa forma, considera-se que a força máxima de tração atuante no sistema deve-se equiparar à força de atrito, tendo a garantia de que o equipamento deixará o repouso. Considerando o peso sobre duas rodas, admite-se que o atrito total esteja sobre elas.

Figura 18 – Forças presentes na roda



Fonte: o autor (2019)

Na sequência apresenta-se a Tabela 1, com os seguintes dados: Massa do conjunto arbitrada do QFD como valor meta, após dividido em cada roda e através de cálculo considerando aceleração da gravidade de  $9,81 \text{ m/s}^2$  transformado em Força.

Tabela 1 – Dados iniciais de entrada

Massa do conjunto	23,00 kg
Força peso do conjunto	225,55 N
Força peso em cada roda	112,78 N
Coefficiente de atrito de Rolamento (borracha sobre concreto)	0,02
Diâmetro externo da roda	100,00 mm
Motor elétrico (rotação máxima atingida)	600,00 rpm
Motor elétrico (torque máximo atingido)	0,49 Nm

Fonte: o autor (2019)

Apresenta-se também na Tabela 1, dados definidos com base em padrões como: o valor típico de atrito de rolamento de borracha sobre concreto (Anexo 8). O Diâmetro de uma possível roda a ser utilizada, escolhida com base em padrões que o mercado oferece, conforme Anexo 5. Definiu-se um modelo de motor elétrico de passo conforme Anexo 1, compacto e de baixo custo, informando sua velocidade máxima e seu torque máximo.

Definiu-se uma inclinação máxima permitida de  $7,125^\circ$  representando os 12,5% que a norma NBR 9050, (ABNT, 2015) de rampas para PNE (portadores de necessidades especiais) especifica. Através dos dados fornecidos, calcula-se a força requerida para o sistema entrar em movimento, associando as três fontes presentes: componente peso no sentido contrário ao movimento, força atrito, e força necessária para aceleração, sendo esta fundamentada por Carvalho et al. (2015). Definindo-se assim o torque requerido em cada roda do equipamento:

$$F = P \cdot \text{sen}(\theta) + \mu \cdot P \cdot \text{cos}(\theta) + m \cdot a$$

$$F = 112,78 \cdot \text{sen}(7,125) + 0,02 \cdot 112,78 \cdot \text{cos}(7,125) + 11,5 \cdot 0,89 = 26,45 \text{ N}$$

$$T = F \cdot r = 26,45 \cdot 0,05 = 1,32 \text{ Nm}$$

#### 4.2.1.1 Dimensionamento das Engrenagens

Com o valor de torque requerido calculado, pode-se sugerir e projetar um modelo de transmissão que atenda aos seguintes requisitos:

- a) torque de saída: 1,32 Nm;
- b) velocidade linear máxima do robô: 0,80 m/s (conforme apresenta meta do QFD).
- c) padronizar ao máximo os modelos de engrenagens utilizados, a fim de reduzir custos de fabricação;

Deve-se escolher um modelo de transmissão a ser implantada no projeto, para este caso a escolha foi de engrenagens, isso em razão da associação de pares engrenados permitirem abundantes possibilidades, no que diz respeito à variação de torque e velocidade, na situação de entrada em comparativo com a de saída.

Dimensionou-se um modelo de transmissão utilizando três pares de engrenagens, sendo o primeiro e segundo de iguais proporções e o terceiro modificado. Essa diferença de padrão do terceiro par possibilita satisfazer os pré-requisitos de velocidade e torque no final

da linha, prevendo também uma possível redução nos custos de fabricação e maior assertividade no acoplamento com as rodas, sendo o último par menor que os demais.

Para efeito de cálculo foram feitas duas considerações importantes. No tange ao ângulo de pressão optou-se em utilizar o padrão de 20°. Já para o rendimento, sabe-se que este, é dado através do par de engrenagens, sendo assim utilizou-se segundo Norton (2004):

- a) rendimento nas engrenagens de 0,97;
- b) rendimento nos mancais ou apoios de rolamento de 0,98.

Resultando em um rendimento ( $\eta$ ) aproximado de 0,95 aplicados a cada par de engrenagens. Apresenta-se o desenvolvimento de cada conjunto de engrenagens, com seus respectivos dados de entrada e saída, possibilitando uma análise passo a passo de suas contribuições formando a transmissão completa.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para as engrenagens em cada caso.

Tabela 2 – Cálculo dos pares de engrenagens

<b>Nomenclatura</b>	<b>01° Par</b>	<b>02° Par</b>	<b>03° Par</b>
Diâmetro primitivo (pinhão)	42,5 mm	42,5 mm	36 mm
N° de dentes (pinhão)	17	17	28
Diâmetro primitivo (engrenagem)	70 mm	70 mm	52 mm
N° de dentes (engrenagem)	28	28	26
Módulo	2,5	2,5	2
Largura das engrenagens	10 mm	10 mm	10 mm
Passo diametral ( $P_d$ )	0,40 mm	0,40 mm	0,50 mm
Passo circular ( $P_c$ )	7,85 mm	7,85 mm	6,28 mm
Adendo (a)	2,50 mm	2,50 mm	2,00 mm
Dedendo (b)	3,13 mm	3,13 mm	2,50 mm
Profundidade de trabalho	5,00 mm	5,00 mm	4,00 mm
Profundidade total	5,63 mm	5,63 mm	4,50 mm
Espessura de dente	3,93 mm	3,93 mm	3,14 mm
Largura mínima requerida do topo	0,63 mm	0,63 mm	0,50 mm
Rendimento do par engrenado	0,95	0,95	0,95
Razão de engrenamento	1,65 : 1	1,65 : 1	1,44 : 1
Torque na saída	0,77 Nm	1,20 Nm	1,65 Nm
Rotação na saída	6,07 rps	3,69 rps	2,55 rps
Velocidade tangencial da roda de tração	-	-	0,80 m/s
Potência na saída	29,27 W	27,80 W	26,41 W
Força tangencial nos dentes ( $W_t$ )	36,10 N	56,49 N	91,52 N
Força radial aplicada nos dentes ( $W_r$ )	13,14 N	20,56 N	33,31 N
Força resultante nos dentes ( $W_n$ )	38,42 N	60,12 N	97,39 N

Fonte: o autor (2019)

A última coluna da Tabela 2, referente ao 3° para de engrenagens, tem por objetivo apresentar os dados obtidos ao final da transmissão, sendo eles os responsáveis por informar se a transmissão estará favorável ao uso. Estes resultados foram utilizados para calcular alguns dados complementares das engrenagens, como largura e tensões, responsáveis pela seleção de materiais, apresentados na sequência do desenvolvimento.

As linhas da Tabela 2 (de passo diametral até largura real do topo) complementam os dados das engrenagens no quesito de projeto e execução, ou seja, baseados na Norma AGMA, estes dados auxiliam na criação das engrenagens, associadas ao diâmetro primitivo e ao número de dentes, é possível desenhá-las com precisão.

Apresenta-se o Fator Geométrico de Resistência a Flexão (J), para os diferentes pares de engrenagens. Os dados de referência foram extraídos da metodologia de Norton (2004) que estão embasados na Norma AGMA, aplicados para cada modelo de engrenagem. Seguindo as seguintes definições: ângulo de pressão 20° e carregamento na ponta (fabricação de engrenagens com tolerâncias mais abertas). A Tabela 3 apresenta os valores.

Tabela 3 – Fator Geométrico de Resistência à Flexão (J)

<b>Par de Engrenagem</b>	<b>Nº de dentes</b>	<b>Peça</b>	<b>J</b>
1° e 2°	14	Pinhão	0,28
	26	Engrenagem	0,33
3°	17	Pinhão	0,30
	26	Engrenagem	0,33

Fonte: o autor (2019)

Dando sequência ao processo construtivo da transmissão. Apresenta-se uma sequência de dados e cálculos que possibilitaram estipular a largura das engrenagens e seu material. A Tabela 4 traz informações referentes aos fatores modificadores presentes.

Tabela 4 – Fatores Modificadores de Condições (K) para 03° Par de Engrenagens

<b>Nomenclatura</b>	<b>Fator</b>
$Q_v$ (Qualidade da fabricação)	8,00
$K_v$ (Fator dinâmico)	0,90
$K_m$ (Fator de distribuição de carga)	1,60
$K_a$ (Fator de aplicação)	1,00
$K_s$ (Fator de tamanho)	1,00
$K_b$ (Fator de espessura de borda)	1,00
$K_i$ (Fator de ciclo de carga)	1,00

Fonte: o autor (2019)

Utilizou-se a equação de Fratura por Fadiga pelo Critério de Goodman (para flexão) buscando a tensão presente na última engrenagem da transmissão, isso por ser a mais solicitada em termos de esforços. Para a largura (F) adotou-se o valor inicial de 10 mm pelo fato de os esforços envolvidos serem baixos e visando redução de custo na fabricação.

$$\sigma_b = \frac{W_t}{mFJ} \cdot \frac{K_a K_m}{K_v} \cdot K_s K_b K_i = \frac{91,52}{2 \cdot 10 \cdot 0,30} \cdot \frac{1 \cdot 1,60}{0,90} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 30,58 \text{ MPa}$$

Calcularam-se os fatores que contribuem para a correção da resistência à Fadiga por Flexão, considerando:

- número de ciclos de vida (N) igual a  $10^{10}$  (vida infinita) para o cálculo de  $K_L$ ;
- confiabilidade mantida de 99% conforme Norma AGMA;
- temperatura de trabalho inferior aos 250 °F (121,1 °C).

Na Tabela 5 é possível visualizá-los.

Tabela 5 – Fatores aplicados para Fadiga de Flexão (K)

Nomenclatura	Fator
$K_L$ (Fator de Vida)	0,89
$K_T$ (Fator de Temperatura)	1,00
$K_R$ (Fator de Confiabilidade)	1,00

Fonte: o autor (2019)

Aplicando os fatores de correção, estima-se o novo valor da Resistência à Fadiga por Flexão ( $S_{fb}$ ). Será considerado ainda um coeficiente de segurança (n) de 1,5.

$$S_{fb} = \frac{\sigma_b \cdot K_T \cdot K_R}{K_L} \cdot n = \frac{30,58 \cdot 1 \cdot 1}{0,89} \cdot 1,5 = 45,88 \text{ MPa}$$

Desta maneira, a seleção de materiais para as engrenagens deverá ser feita de acordo com a nova tensão corrigida. Concluindo, deve-se garantir que o a resistência do material selecionado ( $S'_{fb}$ ) seja maior que a tensão de resistência apresentada na engrenagem ( $S_{fb}$ ).

O Quadro 8 apresenta alguns materiais que atendem a solicitação.

Quadro 8 – Seleção de materiais para engrenagens

Material	Norma	Designação	Tratamento térmico	Dureza superficial mínima	Resistência a Fadiga por flexão	Fator de segurança
Nylon (PA)	ASTM D790	6.6	-	Rockwell 100R	120 MPa	2,6
Acetal (POM)	ASTM D790	-	-	Rockwell 120R	95 MPa	2,1
Ferro Recozido	AGMA	Class 30	Como fundido	175 HB	69 MPa	1,5

Fonte: o autor (2019)

#### 4.2.1.2 Dimensionamento dos Eixos

A partir do modelo de transmissão desenvolvido com três pares de engrenagens, sabe-se que sistema faz uso de quatro eixos, sendo estes: um de entrada, dois intermediários e um de saída. Os maiores esforços e solicitações estarão concentrados no último eixo da linha, isso devido à ampliação de torque ao longo dos estágios e por ser o eixo de apoio das rodas de tração.

Sendo assim, o desenvolvimento dos cálculos de dimensionamento, teve como base o eixo de saída, sendo ele o mais crítico do conjunto. Por questões de dimensionamento de projeto, o diâmetro do eixo já está especificado, sendo comprovado através de cálculos e seleção do seu respectivo material se o mesmo atende a solicitação. Caso positivo a especificação do eixo será adotada para os demais, caso negativo deverá ser recalculado.

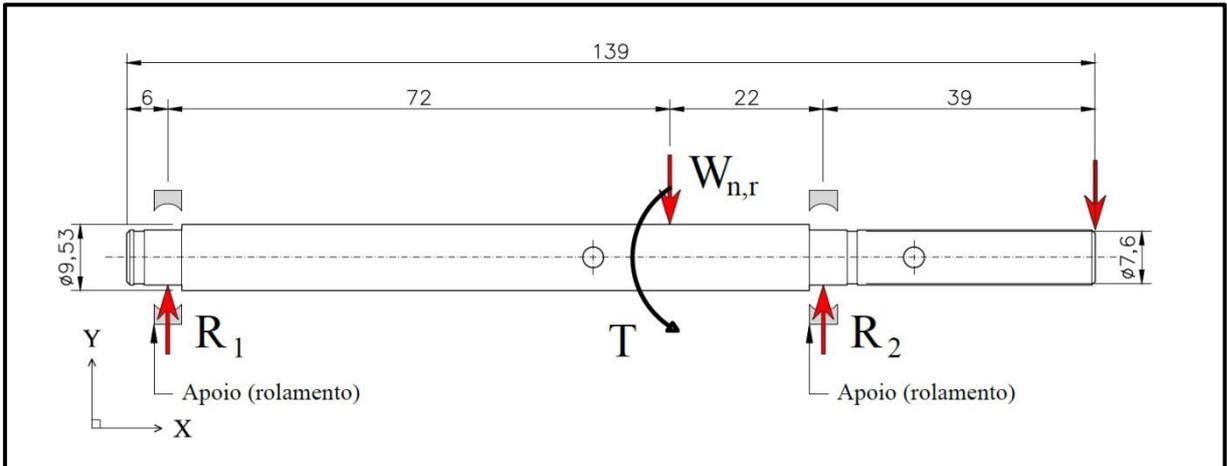
Através da análise do eixo em estudo, percebeu-se que o mesmo está sujeito a solicitações provindas de duas direções distintas, sendo assim, executaram-se os cálculos referentes a estes em dois planos, e ao final encontrou-se os esforços resultantes.

A seguir apresentam-se as solicitações presentes no eixo. Sendo a Figura 19 responsável por apresentar os esforços presentes no eixo, onde  $W_n$  é a força resultante provinda das engrenagens e  $F_R$  é a força provinda da reação da roda com o plano (piso), na imagem, as reações geradas pelos rolamentos estão descritas como  $R_1$  e  $R_2$ .

Os valores das forças presentes no eixo que foram referência para a sequência de cálculos são:

- a)  $W_n = 91,52 \text{ N}$ ;
- b)  $F_R = 112,78 \text{ N}$ .

Figura 19 – Esforços presentes no eixo



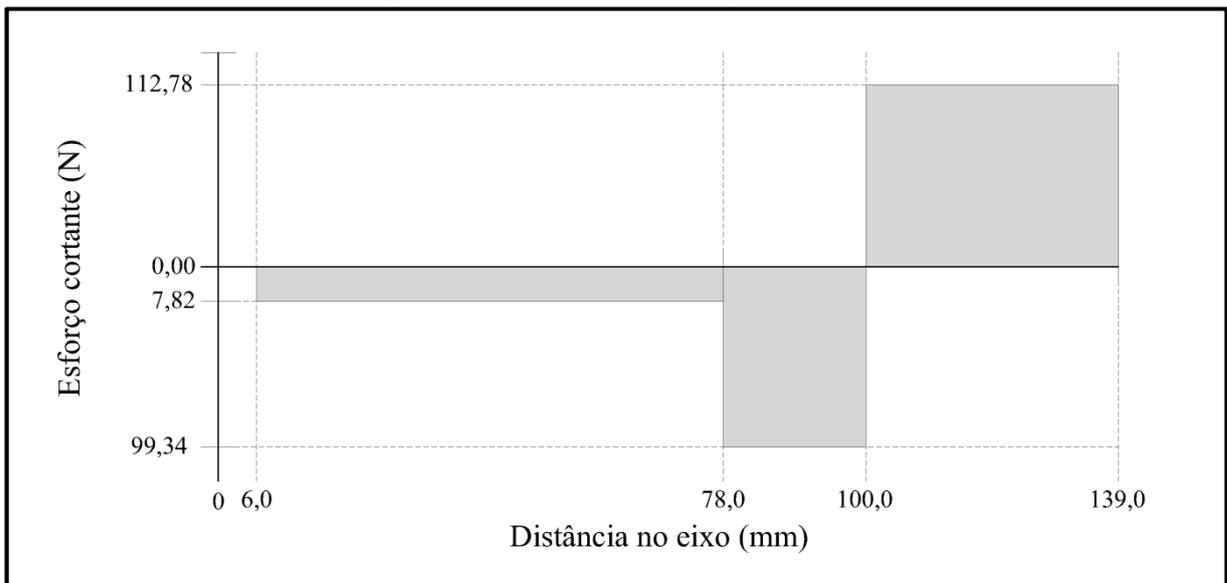
Fonte: o autor (2019)

Para as reações nos rolamentos, os valores são:

- a)  $R_1 = -7,82 \text{ N}$ ;
- b)  $R_2 = 212,12 \text{ N}$ ;

Mediante as forças presentes no eixo referente ao plano (X-Y) e suas respectivas distâncias de referência ao longo do eixo X, possibilitou-se encontrar os valores máximos de esforços cortantes. O gráfico apresentado pela Figura 20 sugere o esforço cortante presente no eixo, apontando seu esforço crítico entre o trecho de 78 a 100 mm.

Figura 20 – Gráfico de esforço cortante



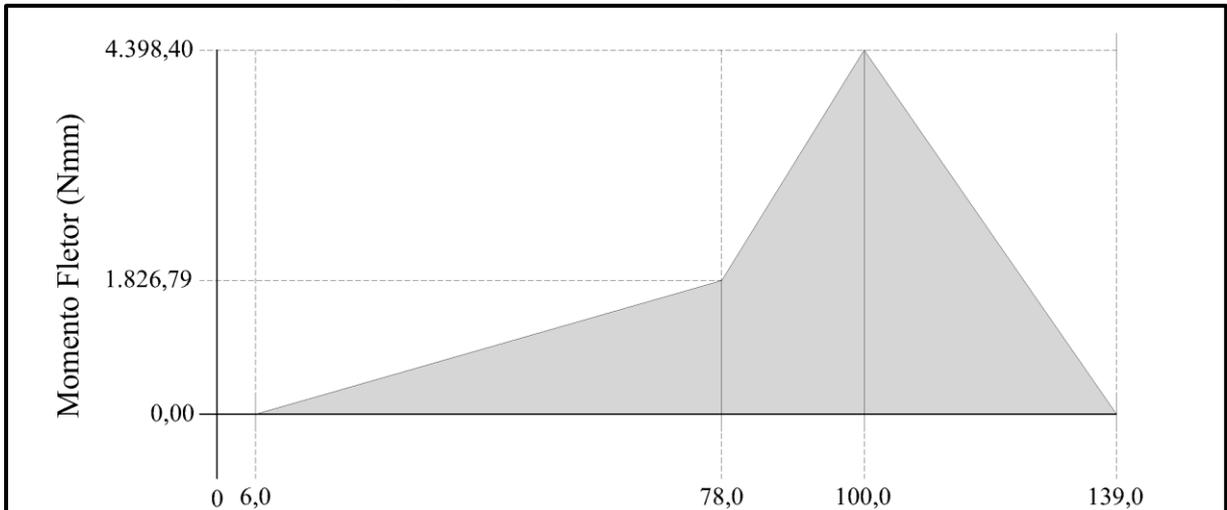
Fonte: o autor (2019)

Os gráficos da Figura 21 e 22 expressam o estudo de momento fletor e do momento torsor respectivamente, pertencente ao Plano X-Y. A análise por trecho, onde  $x$  representa a distância ao longo do eixo, apresentam as seguintes configurações:

- seção de 0 a 6 mm:  $M = 0$ ;
- seção de 6 a 78 mm:  $M = 7,82x - 46,9$ ;
- seção de 78 a 100 mm:  $M = 99,34x - 5.535,5$ ;
- seção de 100 a 139 mm:  $M = -112,78x + 15.676,4$ .

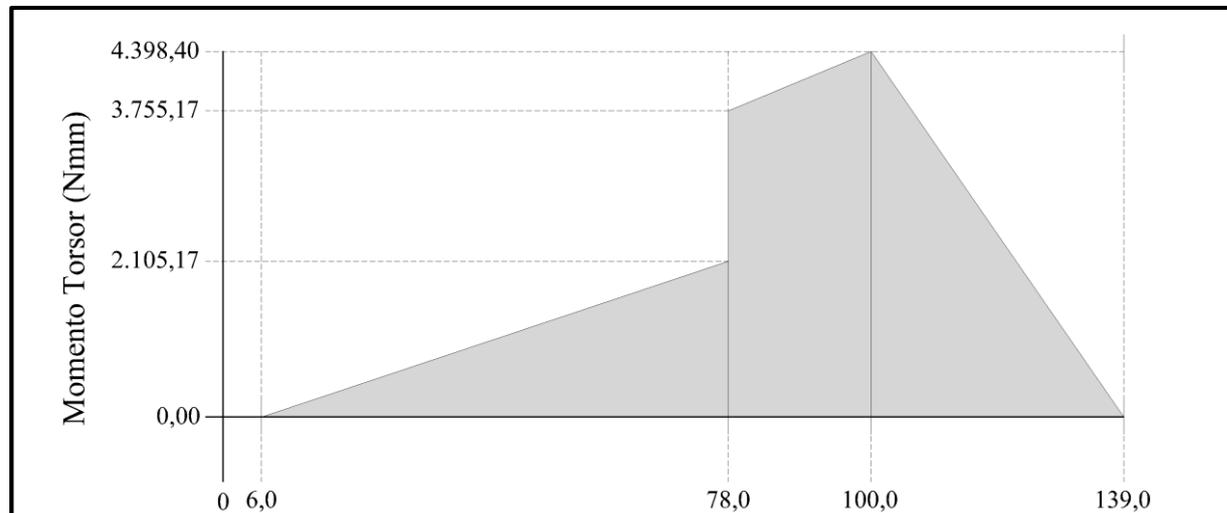
O momento crítico encontrado neste plano está presente na distância de  $x$  equivalente a 100 mm, com respectivo valor de 4.398,40 Nmm, e serviu de referência para o cálculo da resultante.

Figura 21 – Gráfico de momento fletor



Fonte: o autor (2019)

Figura 22 – Gráfico de momento torsor



Fonte: o autor (2019)

A análise prosseguiu da seguinte forma: para  $x$  igual a 100 mm tem-se o valor máximo de momento no eixo.

Através dos cálculos e análise do eixo, ficou comprovado que o momento fletor resultante é de 4.398,40 MPa. Na busca pelo diâmetro correto a ser utilizado, considerou-se os seguintes dados referenciais:

- a) diâmetro inicial arbitrado para o eixo: 9,53 mm sendo 7,60 mm sua seção mais crítica (utilizada para estimativas iniciais);
- b) furação transversal: diâmetro de 3,0mm;
- c) material arbitrado para o eixo: aço carbono SAE 1045 (Limite de Resistência a tração de 560 MPa).

Com o suporte da metodologia de Norton (2004), buscou-se através de gráficos os fatores de concentração de tensão para furos transversais  $K_t$  e  $K_{ts}$ , considerados mais conservadores, com o intuito de se aproximar com maior precisão do diâmetro, estes fatores serão transformados para  $K_f$  e  $K_{fs}$ . A Tabela 6 apresenta os valores originais. Para efeito de cálculo, a literatura sugere duas situações de  $K_{ts}$  utilizou-se o fator mais crítico.

Tabela 6 – Fatores teóricos de concentração de tensão

<b>Nomenclatura</b>	<b>Fator</b>
$K_t$	1,95
$K_{ts}$	2,95

Fonte: o autor (2019)

Calcularam-se os fatores modificadores do Limite de Resistência. Na Tabela 7 é possível visualizá-los.

Tabela 7 – Fatores modificadores do Limite de Resistência

<b>Nomenclatura</b>	<b>Fator</b>
$K_a$ (Fator condição de superfície)	0,84
$K_b$ (Fator modificação de tamanho)	1,00
$K_c$ (Fator modificação de carga)	1,00
$K_d$ (Fator modificação de temperatura)	1,00
$K_e$ (Fator de confiabilidade)	0,81
$K_f$ (Fator de modificação de efeitos variados)	1,56
$K_{fs}$ (Fator de modificação de efeitos variados)	2,37

Fonte: o autor (2019)

Para isso foram feitas as seguintes considerações:

- a) eixo usinado ou laminado a frio;
- b) temperatura de operação muito próxima a do ambiente;
- c) 99% de confiabilidade;
- d) fator de segurança de 1,50.

De posse dos fatores modificadores e de um possível material a ser utilizado, possibilitou-se encontrar os Limites de Resistência:

$$S'_e = S_{ut} \cdot 0,504 = 560 \cdot 0,504 = 282,24 \text{ MPa}$$

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e = 0,84 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,81 \cdot 1,56 \cdot 282,24 = 302,92 \text{ MPa}$$

A Tabela 8 faz referência aos dados finais necessários para se obter um possível diâmetro para o eixo, incluindo o momento resultante (M) e o torque (T) provindo da situação aplicada ao eixo mais crítico.

Tabela 8 – Dados para possibilitar Projeto

Nomenclatura	Dados
Sut (Resistência à tração)	560,00 MPa
S'e (Limite de Resistência)	282,24 MPa
Se (Limite de Resistência)	302,92 MPa
n (Coeficiente de segurança)	1,50
M (Momento Fletor)	4.398,40 Nmm
T (Torque)	1.647,33 Nmm

Fonte: o autor (2019)

Sendo assim, efetuou-se o cálculo de diâmetro final requisitado para esta aplicação:

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot n \cdot K_f \cdot M}{\pi \cdot S_e} \left[ 1 + \sqrt{1 + 3 \left( \frac{K_{fs} \cdot T \cdot S_e}{K_f \cdot M \cdot S_{ut}} \right)^2} \right]}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 1,5 \cdot 1,56 \cdot 4.398,40}{\pi \cdot 302,92} \left[ 1 + \sqrt{1 + 3 \left( \frac{2,37 \cdot 1.647,33 \cdot 302,92}{1,56 \cdot 4.398,40 \cdot 520} \right)^2} \right]}$$

$$d = 7,18 \text{ mm}$$

Desta maneira, obteve-se o requisito de um diâmetro mínimo de 7,18 mm, e tendo como valor arbitrado de 7,60 mm, determina-se que o projeto de eixo está convergente.

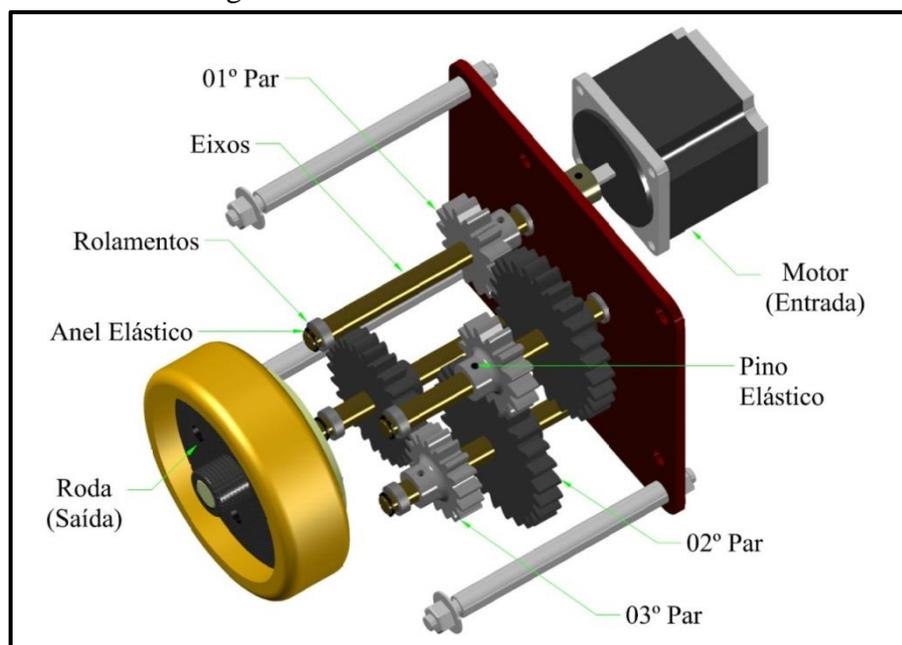
Aplicou-se assim, a utilização do mesmo material e bitola para os demais eixos pertencentes à transmissão. Vale ressaltar que o diâmetro encontrado é o mínimo pertencente aos eixos, sendo o diâmetro externo do componente correspondente a 9,53 mm (3/8”), considerada uma bitola comercialmente convencional, reduz-se assim o custo de fabricação.

Como forma de atualização geral do projeto de eixo, comparando o valor de diâmetro encontrado com o mínimo necessário atualiza-se o coeficiente de segurança arbitrado de 1,5 para o real de 1,78.

#### 4.2.1.3 Especificações de pinos, anéis elásticos e rolamentos

Definida a transmissão por completa, é aceitável fazer a seleção dos materiais que integrarão o conjunto. Os três elementos comerciais elencados na sequência, tiveram sua referência embasada no dimensional do produto. Com todos os elementos resolvidos, apresenta-se a proposta de transmissão conforme Figura 23.

Figura 23 – Visão Geral da Transmissão



Fonte: o autor (2019)

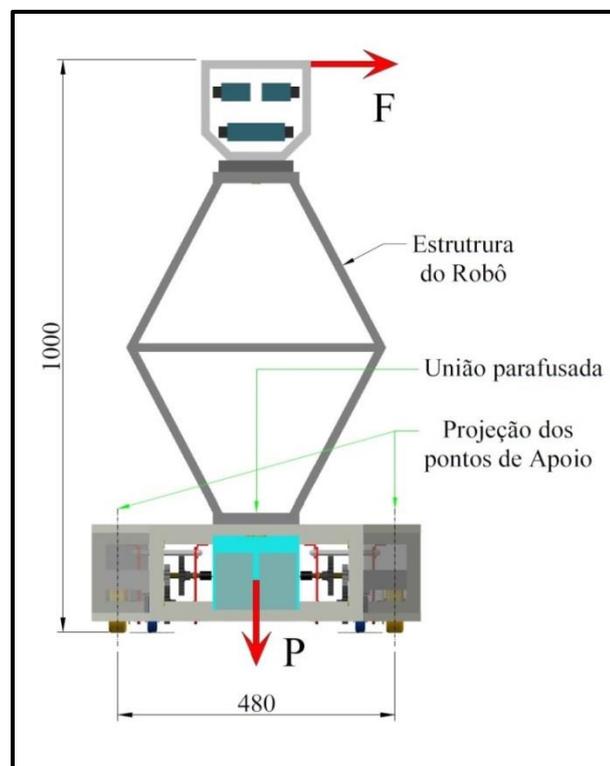
Partindo da fixação entre engrenagens e eixos, optou-se em utilizar pinos elásticos, selecionado conforme Anexo 3. Para o travamento longitudinal dos eixos com as paredes externas da transmissão foram selecionados anéis elásticos de acordo com o Anexo 4. Já para a situação de rodagem dos eixos, visando diminuir atrito e aumentar o rendimento do conjunto, a alternativa adotada foi a utilização de rolamentos, conforme aponta Anexo 2. Para efeito construtivo, os rolamentos serão embutidos na espessura das chapas laterais.

#### 4.2.2 Dimensionamento da Estrutura

A estrutura geral do robô foi desenvolvida com base em alguns fatores de referência, sendo estes provenientes do QFD, e associados com a transmissão criada (produto chave para desenvolvimento da parte inferior da estrutura) e dos componentes padrões de mercado selecionados.

Para definir a dimensão geral da estrutura do robô, criou-se um modelo de referência conforme Figura 24, indicando as forças presentes que afetarão sua estabilidade. Ressaltando que a força peso ( $P$ ) foi considerada centralizada no conjunto geral.

Figura 24 – Forças presentes na estrutura geral



Fonte: o autor (2019)

Com o propósito de modelar a estrutura por completo, ressaltam-se os principais valores meta a serem respeitados em ordem decrescente de importância:

- a) força máxima lateral para não tombamento de 50 N;
- b) área máxima projetada em planta 0,36 m<sup>2</sup>;
- c) altura máxima permitida 1.200 mm;
- d) volume interno mínimo de 0,01 m<sup>3</sup>;
- e) 03 acessos (base, corpo e topo);
- f) não expor componentes internos.

Para a força peso (P) está sendo adotada a carga máxima total aceitável de 23 kg. Definiram-se duas dimensões principais do conjunto, sendo altura (A) de 1.000 mm e comprimento (L) no eixo dos apoios mais externos de 480 mm.

Sendo possível encontrar um valor máximo para a força (F):

$$A \cdot F = P \cdot (L/2) \rightarrow 1.000 \cdot F = (23 \cdot 9,81) \cdot (480/2) \rightarrow F = 54,15 \text{ N}$$

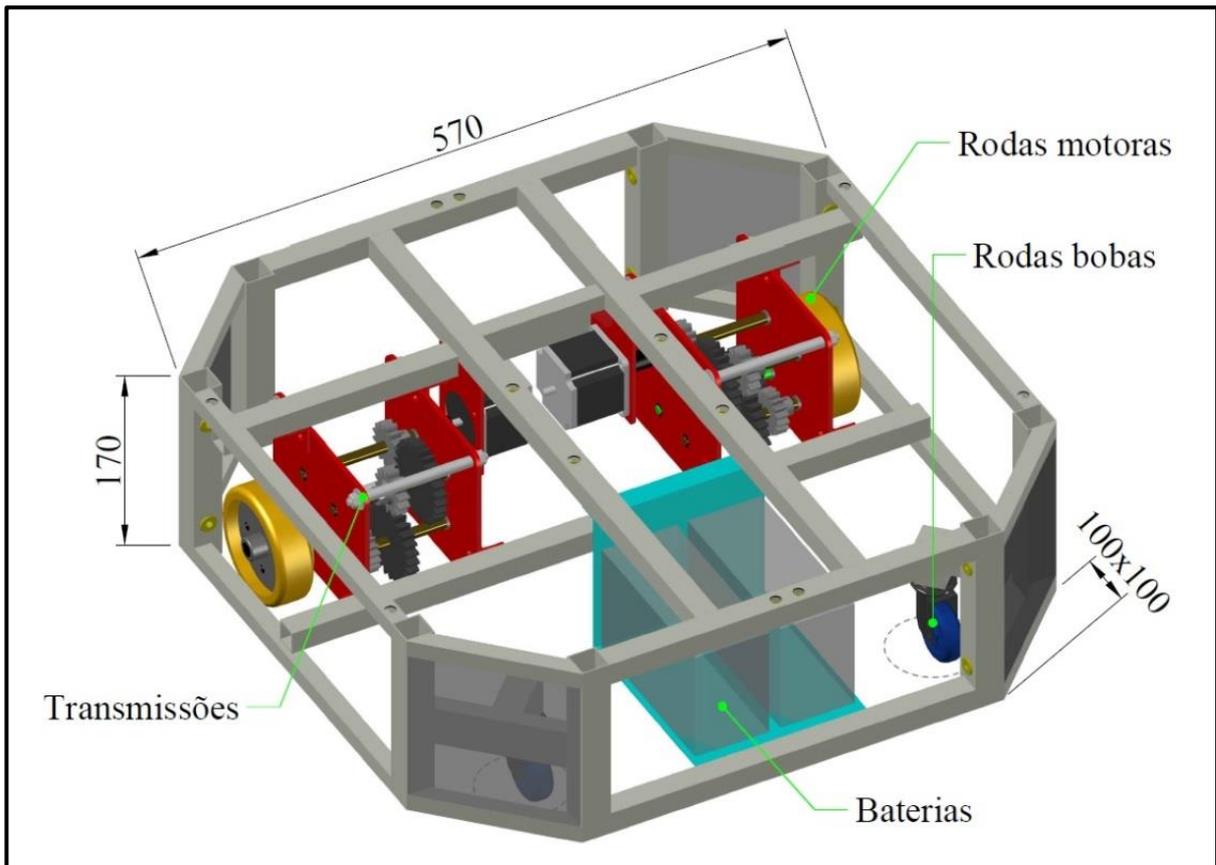
Tem-se como referência a força máxima lateral para não tombamento pelo QFD de 50 N, deste modo atendendo ao requisito por encontrar-se a baixo da força calculada de 54,15 N. Fazendo referência a área projetada em planta, o comprimento entre os apoios de 480 mm, dedicada a estabilidade do conjunto, impactou na criação de uma base com área aproximada de 0,305 m<sup>2</sup> estando também dentro do valor meta estipulado para área da base.

Partindo do modelo geral construtivo, onde se definiu o afastamento entre rodas e a altura total, possibilita-se criar uma estrutura que comporte os componentes necessários para a mobilidade do robô, para isso foram consideradas:

- a) duas baterias conforme Anexo 7 dimensionadas pelos alunos da Engenharia de Controle e Automação, responsáveis pela parte eletrônica deste projeto;
- b) duas rodas bobas responsáveis pelo apoio frontal do conjunto selecionadas conforme Anexo 6.

Desta forma criou-se a estrutura inferior em perfil tubular, inteiramente soldada através do processo GMAW (*Gas metal arc welding*). Os materiais arbitrados para o modelo foram perfis tubulares na bitola 15 x 15 mm e 25 x 25mm de parede 0,90 mm de aço carbono SAE 1020. A Figura 25 apresenta o modelo da estrutura.

Figura 25 – Estrutura inferior



Fonte: o autor (2019)

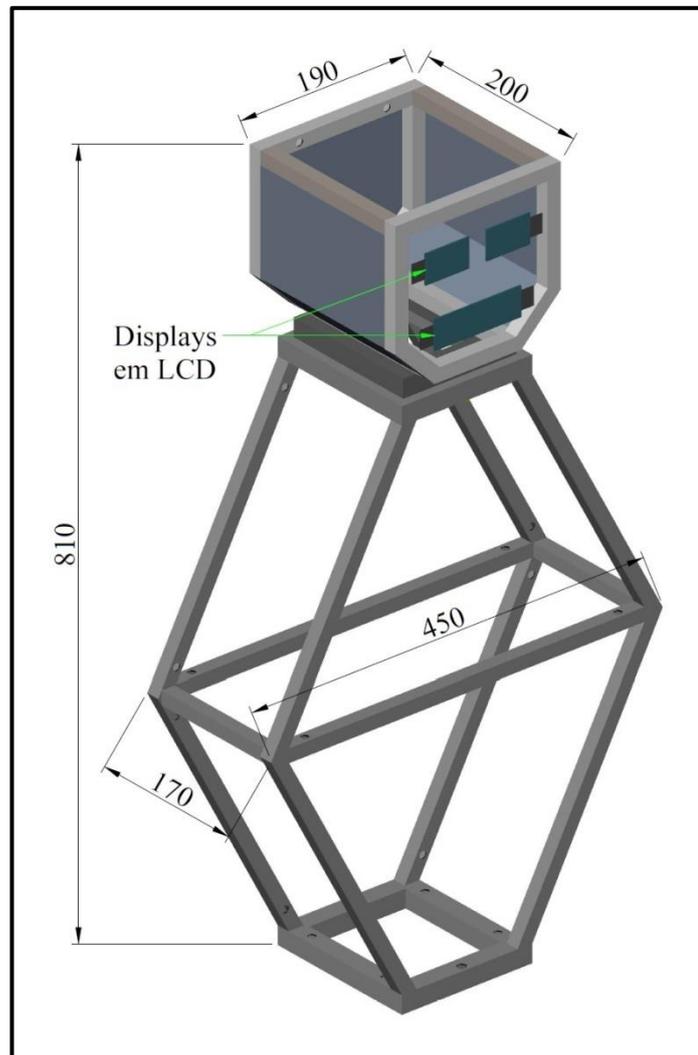
Para a estrutura superior, criou-se um modelo seguindo as três principais características a fim de atender as expectativas do projeto, sendo elas:

- estética semelhante ao corpo de um robô juntamente com sua cabeça;
- estrutura deverá comportar cabeados elétricos e ter espaço frontal na parte superior suficiente para implantar quatro telas de LCD de 32 x 50mm;
- estrutura com menor massa possível, a fim de manter o CG baixo;
- Não estão sendo considerados possíveis aparelhos de transmissão de vídeo para este projeto posicionados na parte superior.

Com base nas características citadas, criou-se uma estrutura confeccionada em perfis tubulares na bitola 15 x 15 mm e 20 x 20 mm de parede 0,90 mm de aço carbono SAE 1020, unidos através do processo de soldagem GMAW (*Gas metal arc welding*).

A Figura 26 apresenta o modelo desenvolvido.

Figura 26 – Estrutura superior



Fonte: o autor (2019)

Com relação às escolhas dos perfis tubulares de Aço SAE 1020, optou-se em utilizá-los pelos seguintes motivos:

- o autor trabalha com estes materiais, facilitando uma possível produção física de um protótipo;
- os perfis tubulares são de fácil acesso comercial, com custo reduzido comparado a materiais como alumínio e polímeros;
- por questões de projeto, no que diz respeito às fixações, foi considerado o uso de rebites com rosca interna que, por sua vez, necessitam de perfis vazados com resistência em suas faces para serem alojados com segurança, além de uma dimensão mínima de 15 mm.

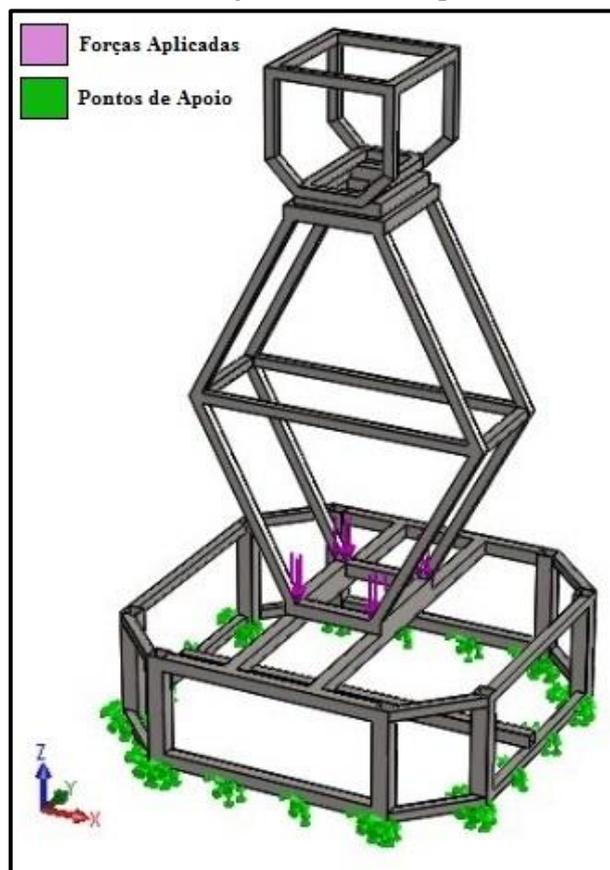
Com o intuito de garantir que a estrutura criada atenda ao projeto sem que ocorram falhas, foram desenvolvidas simulações e posterior análise pelo método de Elementos Finitos

em duas situações consideradas críticas a fim de chegar o mais próximo possível de situações práticas. Para isso foram feitas as seguintes considerações:

- a) a estrutura inferior será engastada na estrutura superior, criando a estrutura geral;
- b) a situação mais crítica: transportar o robô através de sua estrutura superior;
- c) material considerado: será o aço carbono SAE 1020 que possui limite de escoamento de 220 MPa.

Para a primeira situação de análise, posicionaram-se forças distribuídas nos quatro cantos de engaste entre a estrutura inferior e superior simulando arrancamento entre as duas partes. Com o valor aproximado de 60 N cada uma delas. A simulação tem a finalidade de considerar a carga total do conjunto de 225,25 N (23 kg). A Figura 27 demonstra a situação onde as flechas na cor rosa são as forças envolvidas e as verdes os apoios gerais da estrutura com o plano.

Figura 27 – Considerações estruturais para Elementos Finitos

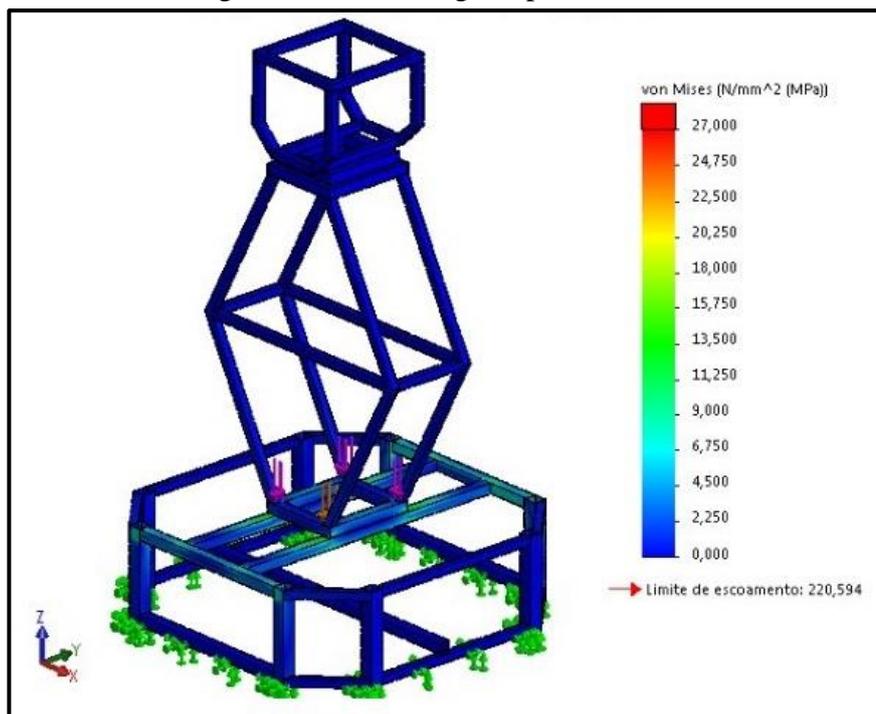


Fonte: o autor (2019)

Ao se executar a análise por Elementos Finitos, tem-se a situação geral apresentada conforme Figura 28.

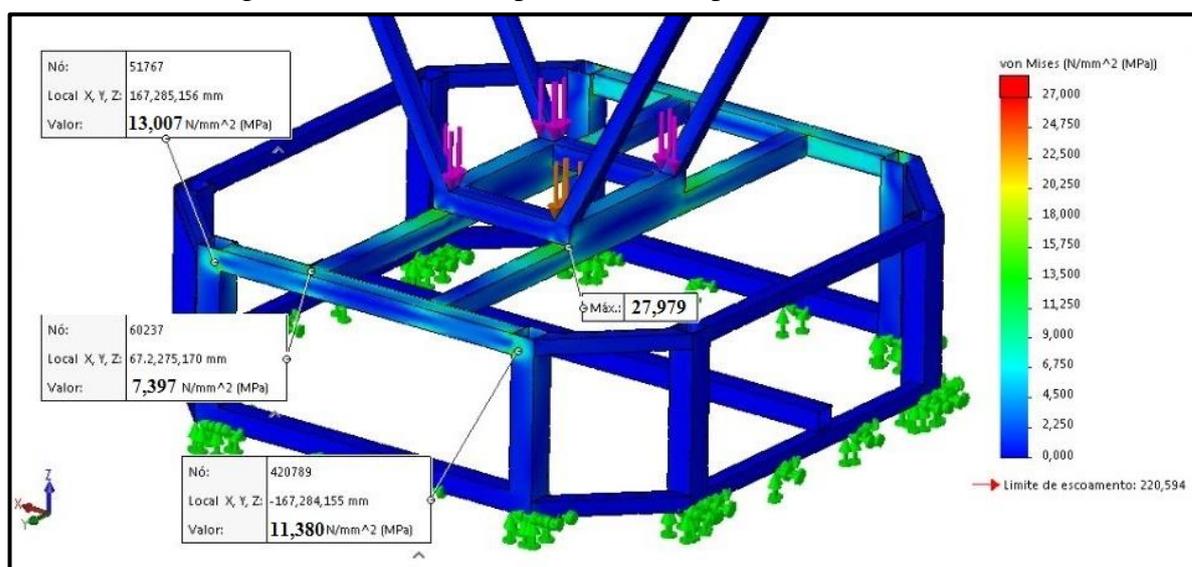
A fim de refinar o estudo apontado o ponto mais crítico da estrutura, observa-se através da Figura 29, que os engastes próximos à junção das estruturas superior e inferior recebem as maiores tensões, com o valor aproximado de 27,97 MPa que comparado ao Limite de Escoamento do Aço utilizado de 220 MPa tem-se a confirmação de que estruturalmente ao modelo não sofrerá falhas.

Figura 28 – Análise geral por Elementos Finitos



Fonte: o autor (2019)

Figura 29 – Análise de pontos críticos por Elementos Finitos

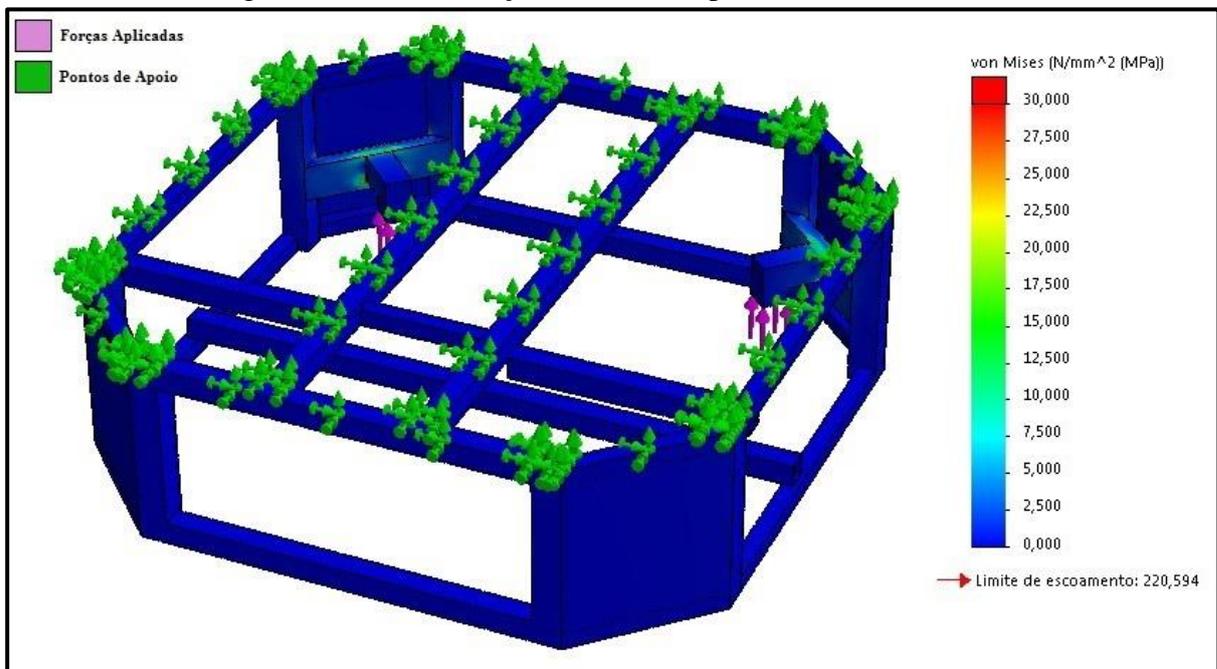


Fonte: o autor (2019)

Para a segunda situação de análise, separou-se a base inferior, que é o elemento de estudo em questão. Engastou-se a parte superior da base, que é plana e sem ressaltos, e aplicou-se cargas de igual valor nas quatro rodas. Mantendo o valor aproximado de 60 N em cada um dos apoios.

A Figura 30 demonstra a situação, onde as flechas na cor rosa são as forças envolvidas, aplicadas exatamente nos apoios das rodas, e as setas na cor verde representam os pontos de engastes da estrutura, uniformemente distribuídos.

Figura 30 – Considerações estruturais para Elementos Finitos

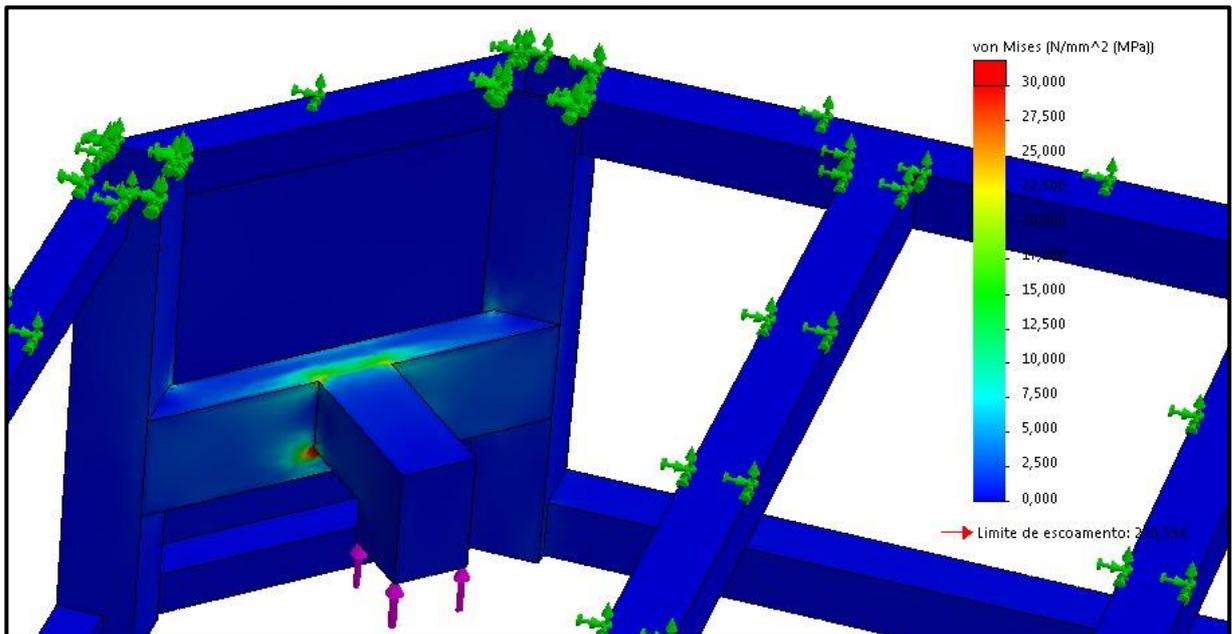


Fonte: o autor (2019)

A Figura 31 apresenta a situação exata do ponto de análise que engloba o ponto de fixação da roda, peça desenvolvida em perfil tubular em formato de L. O conjunto de fixação da roda é composto além da peça em formato em L, de uma barra horizontal que por sua vez está fixada a estrutura geral da base.

Pode-se perceber através da análise que o ponto inferior é quem recebe as maiores tensões. De forma mais precisa o que ocorre na face deste perfil horizontal é um força de tração, extrapolando a situação pode-se dizer que a força exercida pela roda tende a tracionar a parede deste perfil tubular.

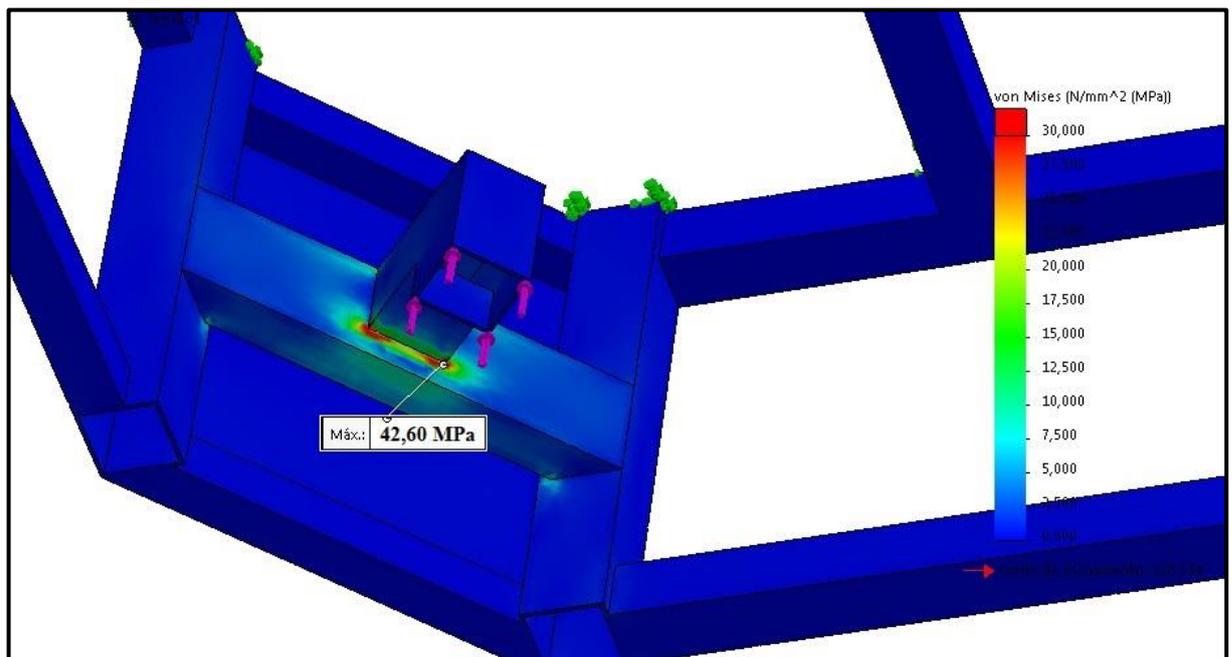
Figura 31 – Análise geral por Elementos Finitos



Fonte: o autor (2019)

A Figura 32 apresenta a situação mais crítica deste conjunto, recebendo as maiores tensões, com o valor aproximado de 42,60 MPa que comparado ao Limite de Escoamento do Aço utilizado de 220 MPa também atende a solicitação.

Figura 32 – Análise de pontos críticos por Elementos Finitos



Fonte: o autor (2019)

### 4.3 PROJETO DETALHADO

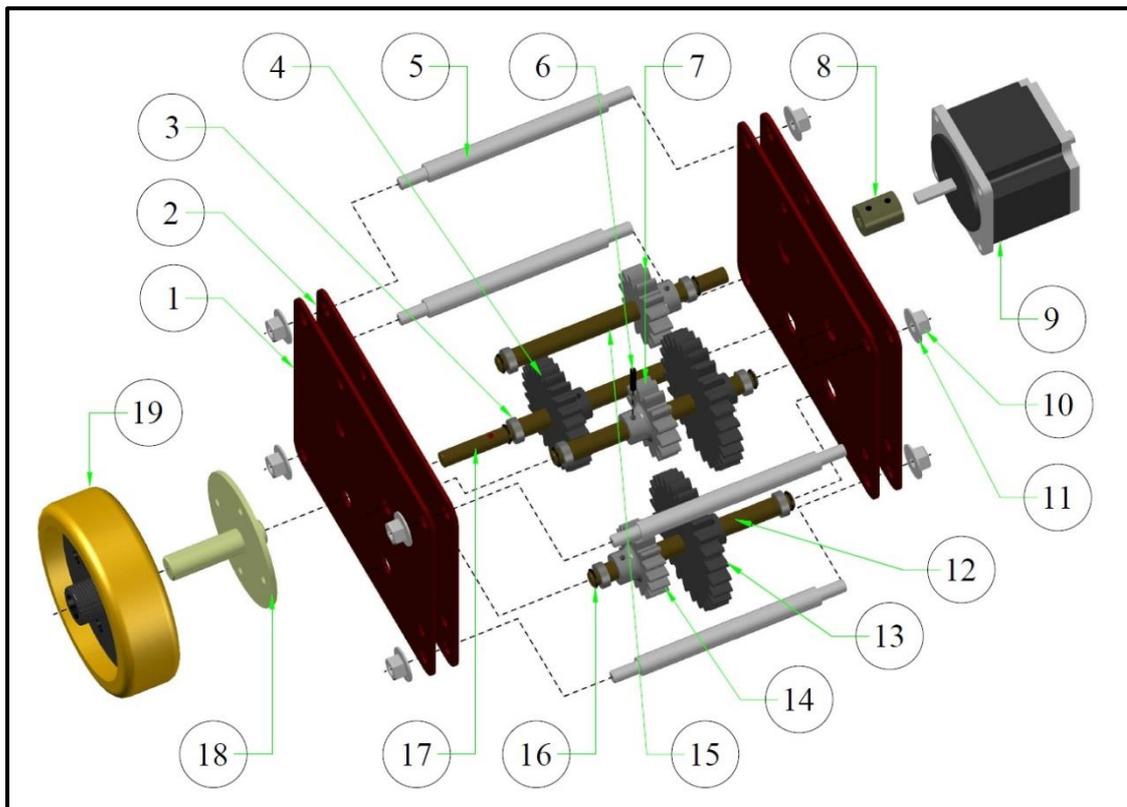
Nesta seção serão apresentados os desenhos gerais de cada conjunto específico do projeto. Separando-os em detalhamento da transmissão, estrutura inferior e superior, acompanhados de suas respectivas tabelas de materiais.

#### 4.3.1 Detalhamento da transmissão

A transmissão apresentada através da Figura 33 está no formato de vista explodida, com suas respectivas peças codificadas nos balões nas extremidades da imagem.

Dentre os itens, têm-se os que deverão ser confeccionadas, por se tratarem de detalhamentos específicos deste projeto além de componentes padronizados, que deverão ser adquiridos conforme especificação.

Figura 33 – Desenho geral dos componentes da transmissão



Fonte: o autor (2019)

O Quadro 9 indica a sequência de componentes utilizados no projeto da transmissão, com seu respectivo material, quantidade e peso unitário do componente.

Quadro 9 – Componentes gerais da transmissão

Item	Descrição / Material	Quant.	Peso unit. [kg]
1	Fecham. Externos / Chapa aço SAE1020 150x135x2,0 mm	4	0,31
2	Fecham. Internos / Chapa aço SAE1020 150x135x2,0 mm	4	0,31
3	Rolamento de esferas / Aço (Ø)12,7 mm (Anexo 2)	16	0,05
4	Engrenagem 3 / Conforme Quadro 16	2	0,17
5	Fuso de fechamento / Aço SAE1020 (Ø)12,7x122 mm	8	0,06
6	Pino elástico / Conforme Anexo 3	18	0,00
7	Pinhão 1 e 2 / Conforme Quadro 16	4	0,08
8	União motor com eixo / Aço SAE1020 (Ø)15,9x20 mm	2	0,03
9	Motor elétrico / Conforme Anexo 1	2	0,42
10	Porca sextavada - 1/4"	16	0,00
11	Arruela lisa -1/4"	16	0,00
12	Eixo motor 2 e 3 / Aço SAE1045 (Ø)9,53x106 mm	4	0,06
13	Engrenagem 1 e 2 / Conforme Quadro 16	4	0,26
14	Pinhão 3 / Conforme Quadro 16	2	0,07
15	Eixo motor 1 / Aço SAE1045 (Ø)9,53x120 mm	2	0,07
16	Anel elástico / Conforme Anexo 4	16	0,00
17	Eixo motor 4 / Aço SAE1045 (Ø)9,53x139 mm	2	0,08
18	União roda com eixo / Aço SAE1020 (Ø)70x50 mm	2	0,12
19	Roda com (Ø)100 mm / Conforme Anexo 5	2	0,22
Somatório total do peso deste conjunto			7,72

Fonte: o autor (2019)

Vale ressaltar que a peça 18 será responsável pela fixação da roda motora através de parafusos, isso implica em adaptar o modelo original da roda incluindo furações na mesma.

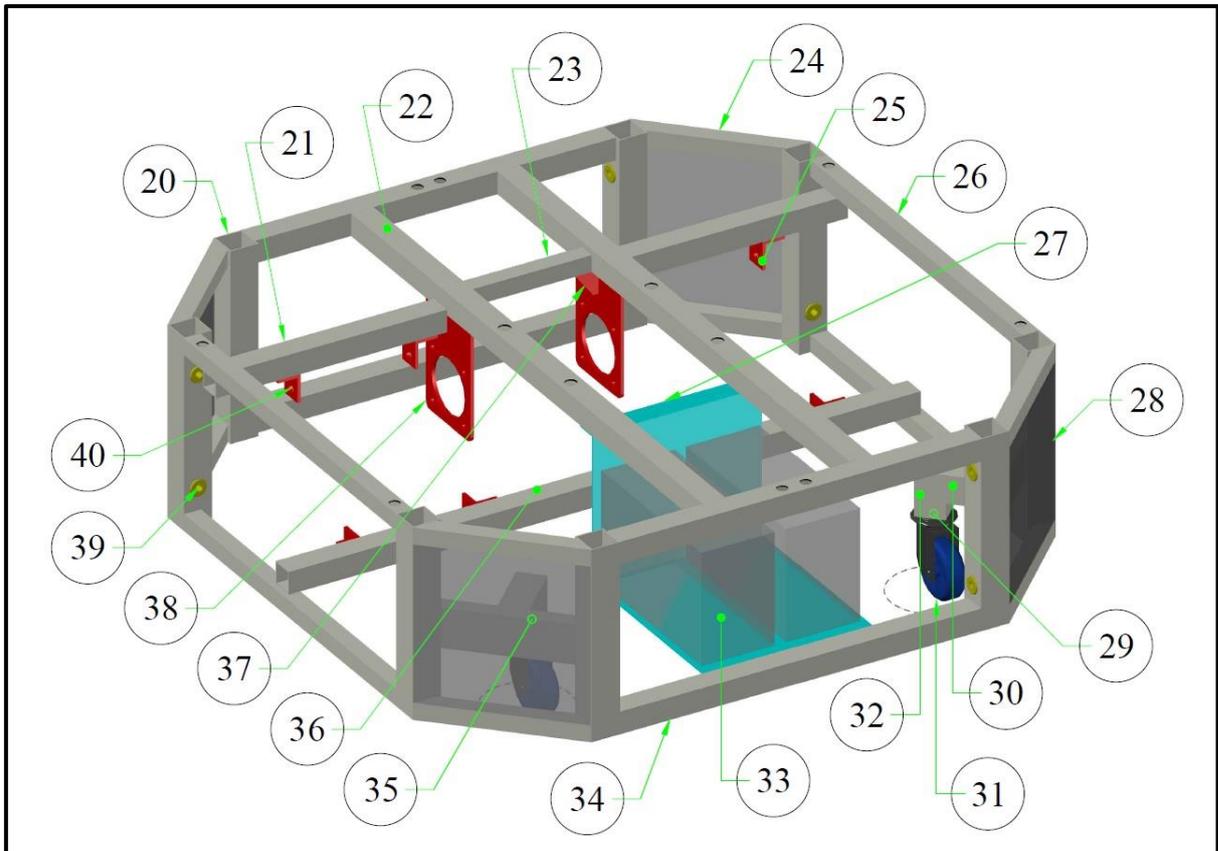
#### 4.3.2 Detalhamento da estrutura inferior

Para a elaboração do projeto detalhado da estrutura inferior do robô, utilizaram-se as bases de cálculo executadas no capítulo anterior, ou seja, analisou-se e comprovou-se que as seções tubulares escolhidas e suas respectivas espessuras atendem as solicitações.

Sendo assim, a Figura 34 juntamente com o Quadro 10, apresentam os materiais selecionados para a construção da estrutura, responsável pelo armazenamento de todos os componentes destinados a movimentação do produto.

Para melhor visualização dos componentes, apresenta-se a transmissão separada da estrutura inferior, porém deve-se entender que a mesma faz parte dessa estrutura, onde se possibilita fazer sua fixação através dos componentes 25, 38 e 40.

Figura 34 – Desenho geral estrutura inferior



Fonte: o autor (2019)

Quadro 10 – Componentes gerais da estrutura inferior

Continua

Item	Descrição/Material	Quant.	Peso unit. [kg]
20	Tubo aço SAE1020 25x25x0,90x170 mm	8	0,12
21	Tubo aço SAE1020 20x20x0,90x205 mm	2	0,11
22	Tubo aço SAE1020 20x20x0,90x530 mm	2	0,29
23	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x110 mm	1	0,04
24	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x141 mm	8	0,05
25	Fixação da transm. / Aço SAE1020 37x20x2,65 mm	8	0,02
26	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x320 mm	4	0,13
27	Apoio de baterias / Aço SAE1020 335x150x0,6 mm	1	0,16
28	Feçam. Lat. fixos / Aço SAE1020 140x139x0,6 mm	4	0,09
29	Fixação roda boba / Porca rebite 3/8" - Bollhoff	2	0,00
30	Tubo aço SAE1020 25x25x0,90x55 mm	2	0,03
31	Roda boba - 2" (Anexo 6)	2	0,20
32	Tubo aço SAE1020 25x25x0,90x40 mm	2	0,02
33	Bateria estacionária 12 V	2	1,50
34	Tubo aço SAE1020 20x20x0,90x320 mm	2	0,17

Item	Descrição/Material	Quant.	Peso unit. [kg]
35	Tubo aço SAE1020 15x35x0,90x141 mm	2	0,09
36	Tubo aço SAE1020 20x20x0,90x520 mm	1	0,28
37	Nervura de reforço / Aço SAE1020 25x25x2,0 mm	2	0,01
38	Fixação dos motores / Aço SAE1020 103x67x3,0 mm	2	0,16
39	Fixações dos fecham. / Porca rebite 1/4" - Bollhoff	28	0,00
40	Fixação transmissão / Parafuso 1/4"x1/2" - (c.p.)	8	0,00
	Porca sextavada - 1/4"	8	0,00
	Arruela lisa -1/4"	16	0,00
Somatório total do peso deste conjunto			7,96

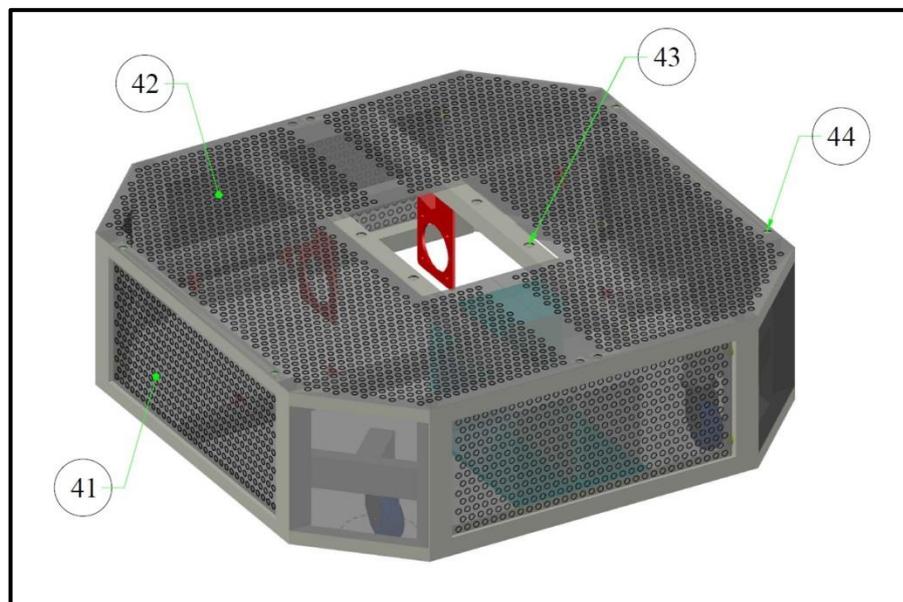
Fonte: o autor (2019)

Como forma de complementar a parte externa da estrutura inferior, a Figura 35 apresenta os fechamentos deste módulo e suas respectivas formas de fixação, tanto para os fechamentos quanto para a união entre a estrutura inferior e superior.

O Quadro 11 trás informações detalhadas pertinentes ao material utilizado e os componentes padrões de mercado.

Vale salientar, que os componentes de fechamento foram desenvolvidos em chapas de aço perfuradas, visando uma possível redução de carga do conjunto e o aumento na ventilação, auxiliando no resfriamento dos equipamentos eletrônicos.

Figura 35 – Desenho geral estrutura inferior com fechamentos



Fonte: o autor (2019)

Quadro 11 – Fechamentos da estrutura inferior

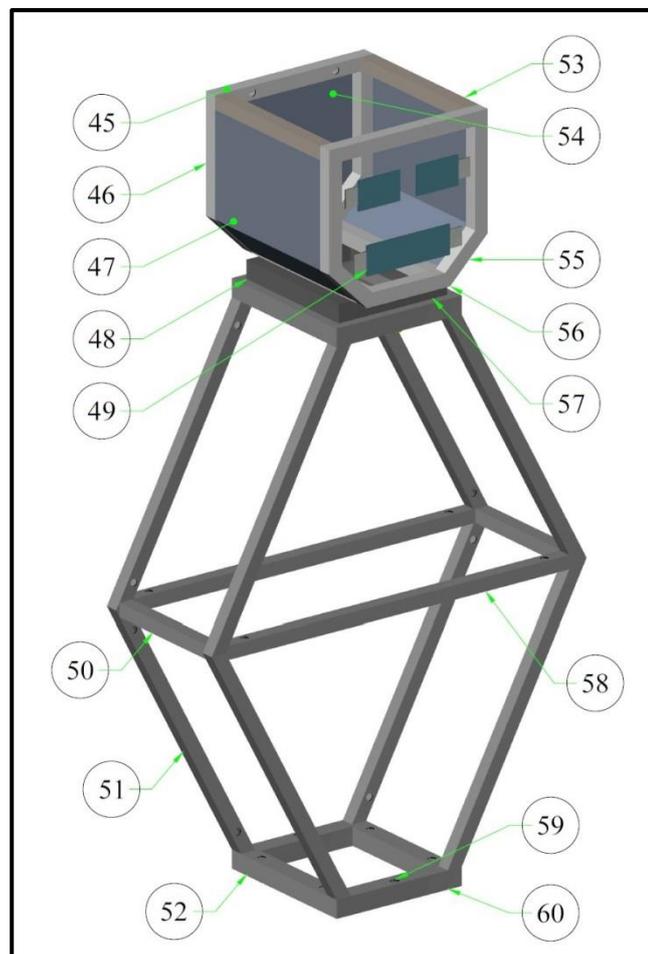
Item	Descrição/Material	Quant.	Peso unit. [kg]
41	Fech. Lat. / Chapa perf. aço SAE1020 346x168x0,6 mm	2	0,47
42	Fech. Sup. / Chapa perf. aço SAE1020 570x285x0,6 mm	4	0,17
43	União de estruturas / Parafuso 1/4"x1.1/2" - (c.p.)	4	0,00
	Arruela lisa - 1/4"	4	0,00
44	Fixação fechamentos / Parafuso 1/4"x1/2" - (c.p.)	24	0,00
Somatório total do peso deste conjunto			1,63

Fonte: o autor (2019)

### 4.3.3 Detalhamento da estrutura superior

Após a comprovação por Elementos Finitos de que a estrutura superior não terá problemas quanto à resistência, detalhou-se os itens que compõem a mesma. Tem-se neste módulo a apresentação de uma possível cabeça e seu corpo. Conforme apresenta a Figura 36.

Figura 36 – Desenho geral estrutura superior



Fonte: o autor (2019)

Toda a parte interna do módulo superior é vazada, sem obstáculos, possibilitando a passagem de cabeados e componentes eletrônicos da base ao topo sem interferência entre as demais partes.

Para o componente que simula a cabeça, não foi projetado um modelo específico de fixação das telas em LCD, pelo fato de não ter o modelo definido. Este módulo possui laterais e fundo fixos.

O Quadro 12 aborda os materiais selecionados para a confecção da estrutura.

Quadro 12 – Componentes gerais da estrutura superior

Item	Descrição/Material	Quant.	Peso unit. [kg]
45	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x190 mm	2	0,07
46	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x130 mm	4	0,05
47	Fecham. Lateral / Aço SAE1020 174x170x0,6 mm	2	0,14
48	Tubo aço SAE1020 20x20x0,90x150 mm	2	0,07
49	Displays em LCD de 32x50 mm	4	0,00
50	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x140 mm	2	0,06
51	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x332 mm	8	0,13
52	Tubo aço SAE1020 20x20x0,90x170 mm	4	0,08
53	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x170 mm	4	0,07
54	Fecham. Posterior / Aço SAE1020 160x145x0,6 mm	1	0,10
55	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x64 mm	4	0,02
56	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x100 mm	2	0,04
57	Tubo aço SAE1020 20x20x0,90x130 mm	2	0,06
58	Tubo aço SAE1020 15x15x0,90x416 mm	2	0,16
59	Fixações dos fecham. / Porca rebite 1/4" - Bollhoff	4	0,00
60	Tubo aço SAE1020 20x20x0,90x5150 mm	4	0,07
Somatório total do peso deste conjunto			3,48

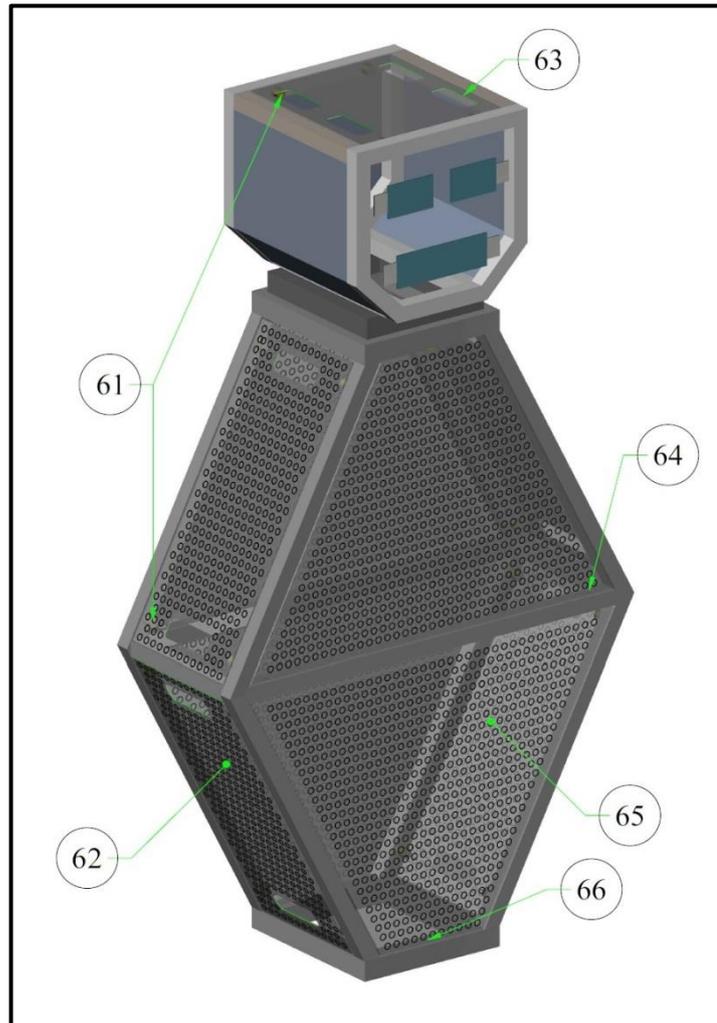
Fonte: o autor (2019)

A estrutura superior possui a parte do corpo confeccionada em chapas de fechamento parafusadas na parte frontal e posterior, porém possui quatro peças laterais que são destacáveis, ou seja, serão travadas com fecho esfera, possibilitando rigidez para o uso e facilitando sua retirada para possíveis manutenções e ajustes em seu interior.

Para o componente que simula a cabeça, têm-se o topo móvel com fácil extração por fecho esfera, seguindo o modelo utilizado para o corpo.

A Figura 37 apresenta a codificação dos modelos de fechamentos e seus respectivos acessórios de fixação.

Figura 37 – Desenho geral estrutura superior com fechamentos



Fonte: o autor (2019)

O Quadro 13 indica o material utilizado para os fechamentos e a especificação dos componentes de padrões comerciais adotados.

Quadro 13 – Fechamentos da estrutura superior

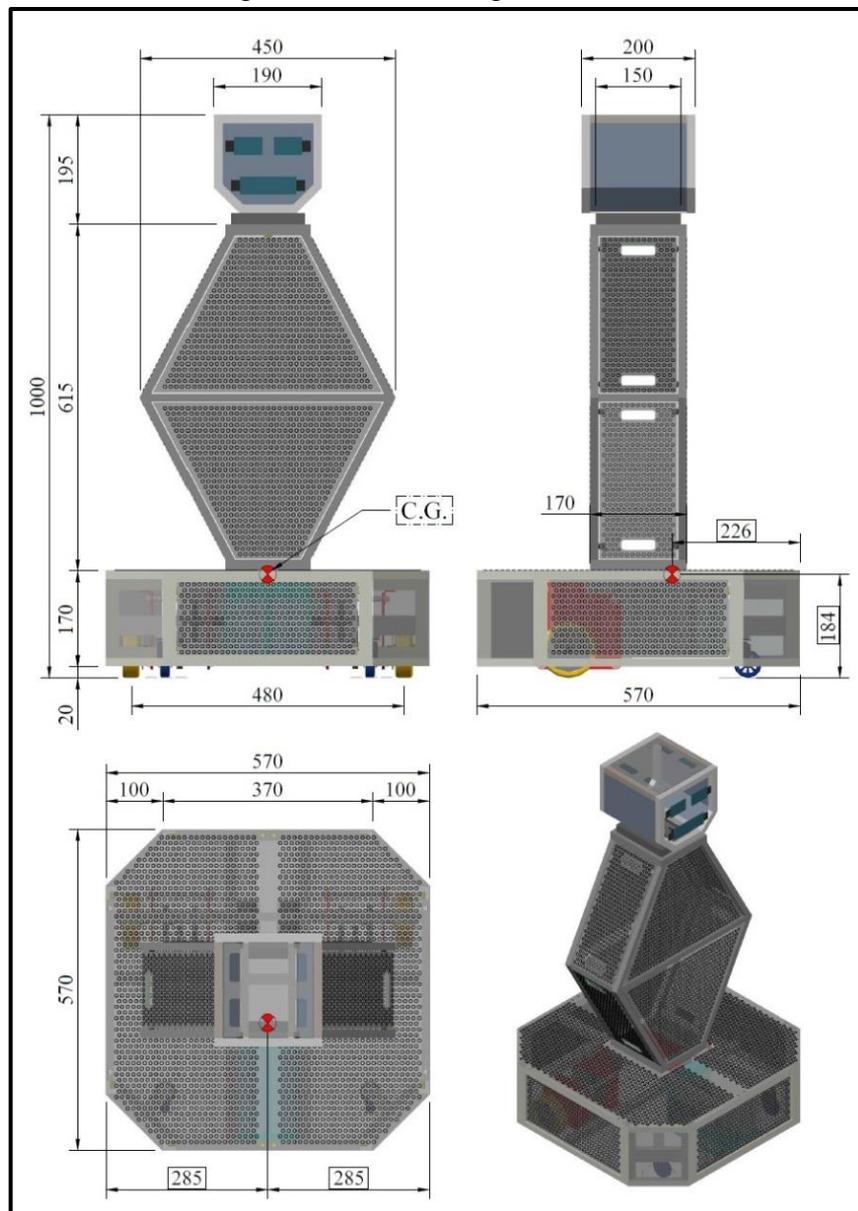
Item	Descrição/Material	Quant.	Peso unit. [kg]
61	Travamento tampas móveis / fecho esfera 3/8"	20	0,00
62	Fech. Lat. / Aço SAE1020 305x166x0,6 mm	4	0,17
63	Fech. Superior / Aço SAE1020 196x186x0,6 mm	1	0,15
64	União de tampas fixas / Parafuso 1/4"x1.1/2" - (c.p.)	4	0,00
	Porca sextavada - 1/4"	4	0,00
	Arruela lisa - 1/4"	8	0,00
65	Fech. Front. / Aço SAE1020 434x312x0,6 mm	4	0,30
66	Fixação fechamentos / Parafuso 1/4"x1.1/2" - (c.p.)	4	0,00
Somatório total do peso deste conjunto			2,06

Fonte: o autor (2019)

Finda-se o sistema detalhado, apresentando os dados numéricos de cargas e espaços internos a fim de comparar com os valores meta apresentados pelo QFD. Para o peso total do conjunto tem-se o valor de 22,85 kg, estando dentro do valor meta de 23 kg. Para o espaço interno tem-se 0,02 m<sup>3</sup> ao passo que o mínimo desejado era de 0,01 m<sup>3</sup>.

Com o dimensionamento e o desenvolvimento completo do projeto detalhado, dos três principais conjuntos que compõem o robô, sendo eles: transmissão, estrutura inferior e estrutura superior, apresenta-se a composição total do conjunto com a apresentação do centro de gravidade (C.G.) através da Figura 38, onde todos os sistemas estão vinculados.

Figura 38 – Desenho geral do robô

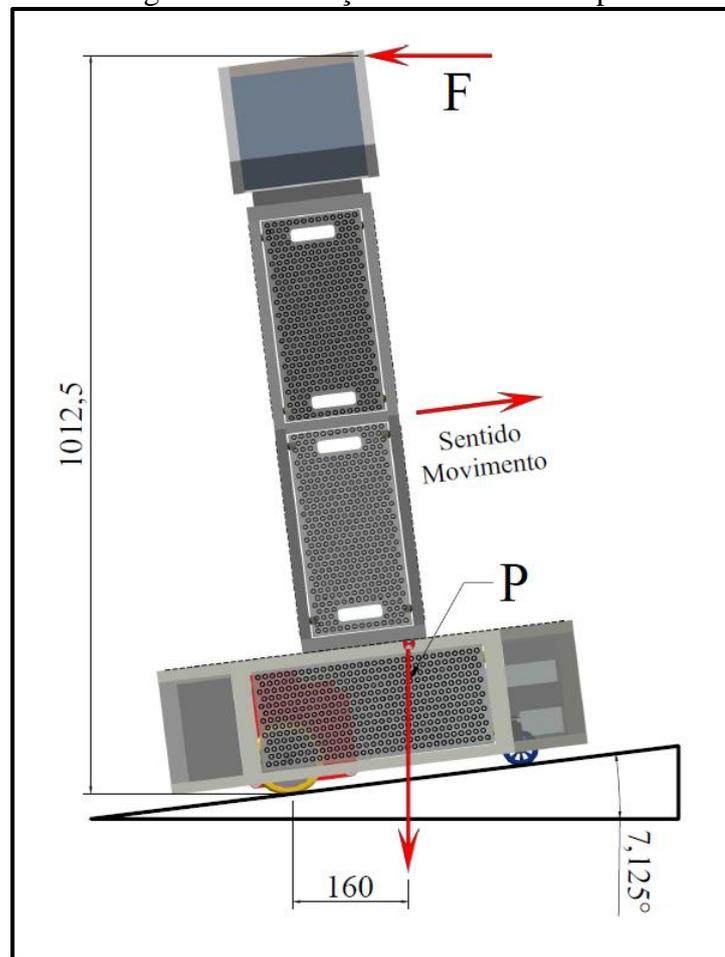


Fonte: o autor (2019)

Com o centro de gravidade definido, possibilita-se apresentar a análise de tombamento em situação de rampa. Para a força peso ( $P$ ) está sendo adotada a carga máxima total aceitável de 23 kg, a altura ( $A$ ) na inclinação passa a ser 1.012,5 mm e a referência ( $x$ ) que seria do apoio mais externo até a projeção do centro de gravidade tem valor definido de 182 mm, dessa forma encontrou-se o valor máxima para a Força ( $F$ ), através da equação abaixo. A Figura 39 representa a situação proposta:

$$A \cdot F = P \cdot x \rightarrow 1.012,5 \cdot F = (23 \cdot 9,81) \cdot (160) \rightarrow F = 35,65 \text{ N}$$

Figura 39 – Situação do robô em rampa



Fonte: o autor (2019)

Mesmo que a força de tombamento em rampa não esteja dentro do limite permitido de 50 N apontado pelo QFD, aponta-se essa situação como um dos possíveis casos que possam ocorrer durante a operação do robô. Onde o mesmo encontra-se, subindo a rampa de maior inclinação possível e recebendo uma força contrária ao movimento em sua maior altura.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho possibilitou enxergar com outros olhos a utilização da robótica, saindo somente do campo de atuação tecnológico e entrando no campo de auxílio a pessoas hospitalizadas. O desenvolvimento através de pesquisas viabilizou junto ao suporte da Engenharia Mecânica a idealização do projeto de um robô, de forma a torná-lo possível de ser realizado.

Para viabilizar o desenvolvimento de forma correta, utilizou-se em paralelo e como referência ao longo deste trabalho os objetivos específicos, desta forma garantindo que os mesmos tenham sido atendidos.

Abaixo são apresentados os requisitos de projeto com seus respectivos valores meta e indicando se foram ou não atendidos.

- a) força máxima lateral para não tombamento: 50 N na maior altura (atendido, podendo chegar a força lateral de 54,15 N no plano, porém, fica registrada a ressalva de que pode haver tombamento para trás com uma força menor, quando o robô estiver subindo a rampa);
- b) rotação e translação: girar para os lados e andar para frente e para trás guiado linearmente (atendido através da utilização de dois motores de passo independentes)
- c) peso máximo: 23 kg (atendido com 22,85 kg);
- d) velocidade limite: 0,8 m/s (atendido utilizando a própria velocidade limite);
- e) possuir proteções adequadas e isolamentos: não expor componentes internos (atendido, porém com o equipamento no sentido de uso, ou seja, rodas apoiadas no plano);
- f) capacidade da bateria: alimentar todos os sistemas elétricos e eletrônicos (não considerado para este projeto, pois fazem parte do escopo da engenharia de controle e automação);
- g) tempo de duração da bateria: mínimo de 30 minutos com todos os sistemas operando (não considerado, pois faz parte do projeto eletroeletrônico de engenharia de controle e automação);
- h) custo máximo: R\$ 1.500,00 (não considerado, pois não foram sequenciados orçamentos dos componentes);
- i) altura máxima: 1.200 mm (atendido com 1.000 mm);
- j) área projetada em planta: 0,6 x 0,6 m ou 0,36 m<sup>2</sup> (atendido com 0,305 m<sup>2</sup>);

- k) materiais e acabamentos superficiais adequados, considerando finalidade e ambiente hospitalar: não apresentar oxidação em peças metálicas (atendido posteriormente fazendo uso de acabamento superficial em pintura eletrostática);
- l) volume interno: mínimo de 0,01 m<sup>3</sup> (atendido com 0,02 m<sup>3</sup>);
- m) prever acesso fácil em todo o equipamento: 03 acessos sendo estes presentes na base, corpo e topo (atendido com tampas de fácil extração por pressão);
- n) diminuir necessidade de ferramentas diferentes para executar regulagens: máximo de 02 tipos de ferramentas para possíveis regulagens (atendido);
- o) custo de componentes de fixação padronizados: máximo de 10% do custo meta (R\$ 150,00) (não considerado, pois não foi executado o custo total);
- p) menor número de componentes possível: máximo de 2 componentes principais repetidos (atendido);

Atendendo a grande parte dos requisitos, em especial os que possuem maior importância como: rotação e translação, força máxima lateral para não tombamento, área projetada em planta, velocidade limite, peso e altura máxima. E compreendendo o detalhamento estrutural e do sistema de propulsão por completo com seus devidos dimensionamentos, atesta-se que o projeto está apto a ser implementado.

Como forma de aperfeiçoamento deste projeto, sugerem-se algumas propostas para trabalhos futuros:

- a) inserção de braços ou garras mecânicas no equipamento, contribuindo para que o robô possa contribuir ainda mais com a interação de pessoas;
- b) revestimentos das superfícies externas em materiais poliméricos, visando uma aparência mais tecnológica e redução de peso;
- c) inserir equipamentos eletroeletrônicos de áudio de vídeo e criar suporte para que estes sejam instalados adequadamente ao modelo.

Sendo assim o objetivo geral, e, portanto os específicos, foram atendidos.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050**: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2015. 148 p.
- BACK, Nelson et al. **Projeto Integrado de Produtos**: planejamento, concepção e modelagem. Barueri: Manole, 2008.
- BAXTER, Mike. **Projeto de produto**: guia prático para o design de novos produtos. 3.ed. São Paulo: Blucher, 2011. 342 p.
- CAMPOS, Flávio Rodrigo. Robótica Educacional no Brasil: questões em aberto, desafios e perspectivas futuras. **Revista Ibero-Americana de Estudos Em Educação**. Araraquara, v. 12, n. 4, p. 2018-2121, out. 2017.
- CARVALHO, Elyson A. N. et al. MEDIÇÃO DE VELOCIDADE ANGULAR COM ALTA RESOLUÇÃO USANDO ENCONDERS DE BAIXA RESOLUÇÃO E PLL. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 21, n. 6, p.616-625, 22 out. 2015
- DEHKORDI, Pegah Soleimman et al. The Design, Development, and Deployment of RoboParrot for Screening Autistic Children. **International Journal Of Social Robotics**, [s.l.], v. 7, n. 4, p.513-522, 5 jul. 2015. Springer Nature.
- DOBER. **Anéis elásticos para retenção em eixos**: Catálogo Digital. Disponível em: <<http://www.dober.com.br/produtos/listar/3/aneis-elasticos.html>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- DOBER. **Pinos elásticos leves**: Catálogo Digital. Disponível em: <<http://www.dober.com.br/produtos/listar/2/pinos-elasticos.html>>. Acesso em: 22 maio 2019.
- GUZMÁN-VALDIVIA, C.h. et al. HipBot – The design, development and control of a therapeutic robot for hip rehabilitation. **Mechatronics**, [s.l.], v. 30, p.55-64, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.06.007>.
- HIBBELER, Russel Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010.
- ISHIGAMI, Genya et al. Design, Development, and Mobility Evaluation of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain. **Journal Of Field Robotics**, [s.l.], v. 32, n. 6, p.880-896, 13 nov. 2014. Wiley.
- KNIGHT, Randall D.. **Física**: Uma bordagem estratégica. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 392 p
- LOPES, Lídia et al. A robótica educacional como ferramenta multidisciplinar: um estudo de caso para a formação e inclusão de pessoas com deficiência. **Revista Educação Especial**, [s.l.], v. 28, n. 53, p.735-749, 28 set. 2015. Universidade Federal de Santa Maria.
- MOTT, Robert L.. **Elementos de máquinas em projetos mecânicos**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2015.

NEOMOTION. **Motores de Passo:** Catálogo Técnico. Disponível em: <<https://neomotion.com.br/wp-content/uploads/2019/03/Cat%C3%A1logo-Datasheet-dos-motores-de-passo-R05.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2019.

NORTON, Robert Lawrence. **Projeto de máquinas:** uma abordagem integrada. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

NOVEX. **Rodas e rodízios:** Catálogo. Disponível em: <<http://www.novex.com.br/br/catalogo>>. Acesso em: 23 maio 2019.

NSK. **Rolamentos de esferas, pequenos e miniaturas:** Catálogo Geral. Disponível em: <[http://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK\(1\).pdf](http://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK(1).pdf)>. Acesso em: 20 maio 2019.

PAHL, Gerhard. **Projeto na engenharia:** fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações. São Paulo: E. Blücher, 2005. xvi, 411 p.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang. **Engineering Desing:** A Systematic Approach. 2. ed. Great Britain: Springer, 1996.

PINOCHET, Luis Hernan Contreras; LOPES, Aline de Souza; SILVA, Jheniffer Sanches. Inovações e Tendências Aplicadas nas Tecnologias de Informação e Comunicação na Gestão da Saúde. **Revista de Gestão em Sistemas de Saúde**, [s.l.], v. 03, n. 02, p.11-29, 1 dez. 2014. University Nove de Julho.

RAMÍREZ, Pedro Antonio López; SOSA, Hugo Andrade. Aprendizaje con robótica, algunas experiencias. **Revista Educación:** San Pedro, San José, v. 37, n. 1, p.43-63, 30 jun. 2013.

ROZENFELD, Henrique et al.(). **Gestão de desenvolvimento de produtos:** uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva, 2006. 542 p.

SAHIN, Osman Nuri et al. Design and development of an educational desktop robot R3D. **Computer Applications In Engineering Education**, [s.l.], v. 25, n. 2, p.222-229, 1 fev. 2017.

SANDOVAL-GONZALEZ, Oscar et al. Design and Development of a Hand Exoskeleton Robot for Active and Passive Rehabilitation. **International Journal Of Advanced Robotic Systems**, [s.l.], v. 13, n. 2, p.66-77, mar. 2016. SAGE Publications.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G.. **Projeto de Engenharia Mecânica.** 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

TABILE, Rubens et al. Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 31, n. 1, p.130-142, fev. 2011. FapUNIFESP (SciELO).

UNIPOWER. **Bateria selada:** Produtos. Disponível em: <<https://unipower.com.br/categoria-produto/produtos/baterias/bateria-selada/>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

## ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR



## AK23/4.6F6FL1.8

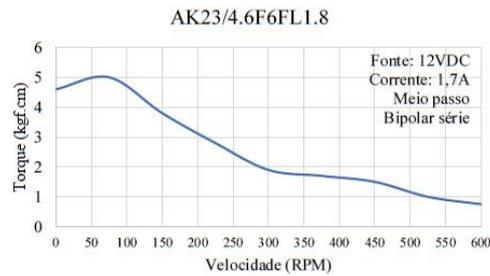
## ESPECIFICAÇÕES GERAIS

Especificação	Valor	Bipolar Série	
Ângulo do passo	1,8°	Fio do motor	Terminal do driver
Número de passos	200	Vermelho	A+
Enrolamento	Bifilar	Verde	A-
Temperatura de operação máx.	80°C	Amarelo	B+
Temperatura ambiente	-10°C ~ 50°C	Azul	B-
Resistência de isolamento	100VAC / 500VDC	Branco / Preto	Isolados individualmente
Rigidez dielétrica	500VAC / 1min	Unipolar	
Classe de isolamento	B	Fio do motor	Terminal do driver
Esforço radial máximo	0,03mm - 400g de carga	Vermelho	A+
Esforço axial máximo	0,03mm - 500g de carga	Verde	A-
Detent torque	300gf.cm	Amarelo	B+
Inércia rotórica	120g.cm <sup>2</sup>	Azul	B-
Quantidade de fios	6	Branco / Preto	Comum
Peso	0,42kg		

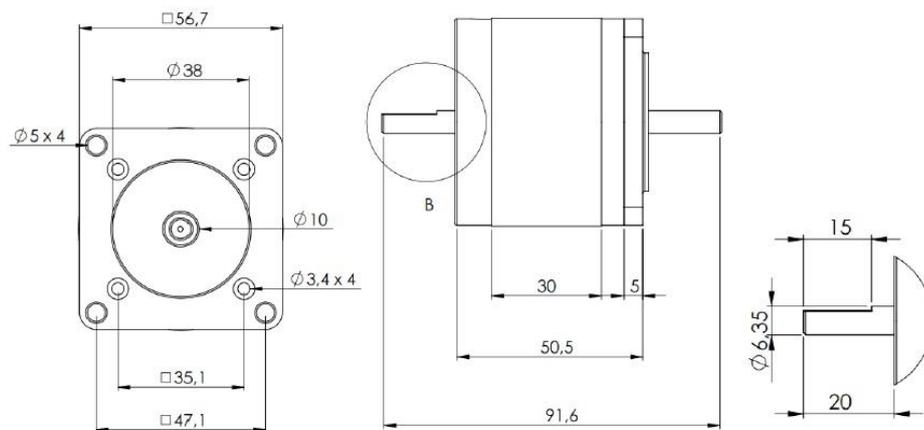
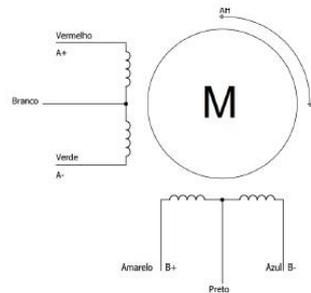
## TABELA DE SELEÇÃO

NEMA	MODELO	CONEXÃO	HOLDING TORQUE (kgf.cm)	CORRENTE (A/fase)	TENSÃO (V/fase)	RESISTÊNCIA (Ω/fase)	INDUTÂNCIA (mH/fase)	PESO (kg)
23	AK23/4.6F6FL1.8	Bipolar   Série	4,6	0,7	7	10	24,8	0,42
		Unipolar	3,2	1	5	5	6,2	

## INFORMAÇÕES TÉCNICAS



## Ligação série ou unipolar



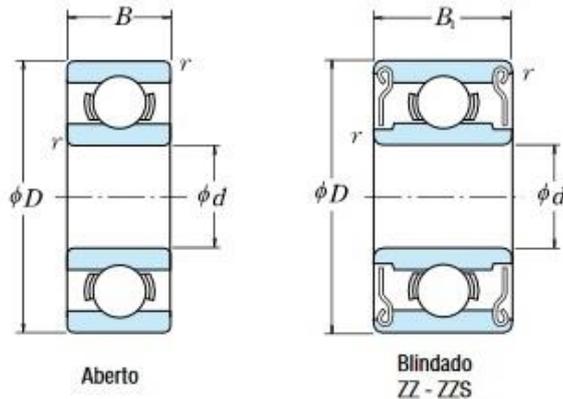
Rua Senador Petrónio Portela, 47 – Galpão 05 - Zona Industrial Norte - 89219-575 - Joinville/SC – Telefone: (47) 3029-8730

## ANEXO 2 – ESPECIFICAÇÃO DO ROLAMENTO

### ROLAMENTOS DE ESFERAS, PEQUENOS E MINIATURAS

**Série Polegada**

**Diâmetro do Furo 1.016 – 9.525 mm**



$d$	Dimensões (mm)				Capacidade de Carga Básica (N)				Limite de Rotação (rpm)		Número do Aberto
	$D$	$B$	$B_1$	$r$ min.	$C_r$	$C_{0r}$	$C_r$	$C_{0r}$	Graxa Aberto Z - ZZ	Óleo Aberto Z	
<b>1,016</b>	3,175	1,191	—	0,1	80	23	8	2,5	130 000	150 000	<b>R 09</b>
<b>1,191</b>	3,967	1,588	2,380	0,1	138	35	14	3,5	110 000	130 000	<b>R 0</b>
<b>1,397</b>	4,762	1,984	2,779	0,1	231	66	24	6,5	90 000	110 000	<b>R 1</b>
<b>1,984</b>	6,350	2,380	3,571	0,1	310	108	32	11	67 000	80 000	<b>R 1-4</b>
<b>2,380</b>	4,762	1,588	—	0,1	188	60	19	6	80 000	95 000	<b>R 133</b>
	4,762	—	2,380	0,1	143	52	15	5,5	80 000	95 000	—
	7,938	2,779	3,571	0,15	550	175	56	18	60 000	71 000	<b>R 1-5</b>
<b>3,175</b>	6,350	2,380	2,779	0,1	283	95	29	9,5	67 000	80 000	<b>R 144</b>
	7,938	2,779	3,571	0,1	560	179	57	18	60 000	67 000	<b>R 2-5</b>
	9,525	2,779	3,571	0,15	640	225	65	23	53 000	63 000	<b>R 2-6</b>
<b>3,175</b>	9,525	3,967	3,967	0,3	630	218	64	22	56 000	67 000	<b>R 2</b>
	12,700	4,366	4,366	0,3	640	225	65	23	53 000	63 000	<b>R 2A</b>
<b>3,967</b>	7,938	2,779	3,175	0,1	360	149	37	15	53 000	63 000	<b>R 155</b>
<b>4,762</b>	7,938	2,779	3,175	0,1	360	149	37	15	53 000	63 000	<b>R 156</b>
	9,525	3,175	3,175	0,1	710	270	73	28	50 000	60 000	<b>R 166</b>
	12,700	3,967	4,978	0,3	1 300	485	133	49	43 000	53 000	<b>R 3</b>
<b>6,350</b>	9,525	3,175	3,175	0,1	420	204	43	21	48 000	56 000	<b>R 168B</b>
	12,700	3,175	4,762	0,15	1 080	440	110	45	40 000	50 000	<b>R 188</b>
	15,875	4,978	4,978	0,3	1 610	660	164	68	38 000	45 000	<b>R 4B</b>
<b>7,938</b>	19,050	5,558	7,142	0,4	2 620	1 060	267	108	36 000	43 000	<b>R 4AA</b>
	<b>7,938</b>	12,700	3,967	3,967	0,15	540	276	55	28	40 000	48 000
<b>9,525</b>	22,225	5,558	7,142	0,4	3 350	1 410	340	144	32 000	38 000	<b>R 6</b>

**Observações** 1. Nos rolamentos blindados onde o anel externo é o que gira, recomenda-se consultar a NSK.

2. Rolamentos com blindagem dupla (ZZ, ZS) também disponíveis com uma blindagem (Z, ZS).

Fonte: NSK (2019)

### ANEXO 3 – ESPECIFICAÇÃO DO PINO ELÁSTICO

DOBER		Fabril Técnica de Elementos Padronizados LTDA.						
FIXAÇÃO		CNPJ: 00.303.119/0001.33 - I.E.: 350.002.640.116						
GRUPO 02		PINOS ELÁSTICOS LEVES				DIN 7346		
O diâmetro nominal abaixo refere-se ao diâmetro de alojamento do pino, usinado com tolerância H12								
Diâmetro nominal		2	2,5	3	3,5	4	4,5	
s		0,2	0,25	0,3	0,35	0,5	0,5	
d <sub>1</sub>		2,3	2,8	3,3	3,8	4,4	4,8	
Tol.		+ 0,1			+ 0,2			
F (kN)		1,5	2,4	3,5	4,6	8	8,8	
Comprimento C		O 1º número é o código DOBER ; o 2º indica o peso de 1000 peças (kg). Ex.: desejando um pino para diâmetro nominal 2mm e comprimento C de 4mm, temos : Código 020200004, cujo peso é de 0,034kg/1000.						
4	tol.	1º 2º	020200004 0,034	020250004 0,054	020300004 0,078	020350004 0,106	020400004 0,168	020450004 0,193
5	+0,5	1º 2º	020200005 0,043	020250005 0,067	020300005 0,097	020350005 0,132	020400005 0,210	020450005 0,241
6		1º 2º	020200006 0,051	020250006 0,080	020300006 0,116	020350006 0,159	020400006 0,252	020450006 0,289
8	+0,5	1º 2º	020200008 0,068	020250008 0,107	020300008 0,155	020350008 0,212	020400008 0,336	020450008 0,385
10		1º 2º	020200010 0,085	020250010 0,134	020300010 0,193	020350010 0,264	020400010 0,420	020450010 0,481
12	+0,5	1º 2º	020200012 0,102	020250012 0,161	020300012 0,232	020350012 0,317	020400012 0,504	020450012 0,578
14		1º 2º	020200014 0,119	020250014 0,187	020300014 0,271	020350014 0,370	020400014 0,588	020450014 0,674
16	+0,5	1º 2º	020200016 0,136	020250016 0,214	020300016 0,309	020350016 0,423	020400016 0,672	020450016 0,770
18		1º 2º	020200018 0,153	020250018 0,241	020300018 0,348	020350018 0,476	020400018 0,756	020450018 0,866
20	+1	1º 2º	020200020 0,170	020250020 0,267	020300020 0,386	020350020 0,528	020400020 0,840	020450020 0,962
22		1º 2º	020200022 0,187	020250022 0,294	020300022 0,425	020350022 0,581	020400022 0,924	020450022 1,06
24	+1	1º 2º	020200024 0,204	020250024 0,321	020300024 0,464	020350024 0,634	020400024 1,01	020450024 1,16
26		1º 2º	020200026 0,221	020250026 0,347	020300026 0,502	020350026 0,687	020400026 1,09	020450026 1,25
28	+1	1º 2º	020200028 0,238	020250028 0,374	020300028 0,541	020350028 0,740	020400028 1,18	020450028 1,35
30		1º 2º	020200030 0,255	020250030 0,400	020300030 0,579	020350030 0,792	020400030 1,26	020450030 1,44
32	+1	1º 2º			020300032 0,618	020350032 0,845	020400032 1,34	020450032 1,54
36		1º 2º			020300036 0,695	020350036 0,951	020400036 1,51	020450036 1,73
40	+1	1º 2º			020300040 0,772	020350040 1,06	020400040 1,68	020450040 1,92
45		1º 2º					020400045 1,89	020450045 2,16
50	+1	1º 2º					020400050 2,10	020450050 2,40

Material: Aço mola beneficiado.  
Acabamento: Fosfatizado.

Outras medidas, materiais e acabamentos sob encomenda.

Fonte: Dober (2019)

ANEXO 4 – ESPECIFICAÇÃO DO ANEL ELÁSTICO

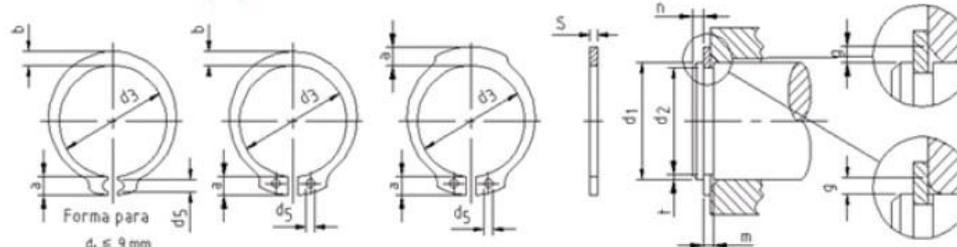
DOBER

FIXAÇÃO

Fabril Técnica de Elementos Padronizados LTDA.  
 CNPJ: 00.303.119/0001.33 - I.E.: 350.002.640.116

GRUPO 03 ANÉIS ELÁSTICOS PARA RETENÇÃO EM EIXOS DIN 471

Os anéis do grupo 03 serão fornecidos facultativamente em uma das formas abaixo.



d3 é o diâmetro para o anel livre  
K = carga máxima admissível

O diâmetro do eixo (d1) é usado para designar o diâmetro nominal do anel

d <sub>1</sub>	s	Tol. s	d <sub>3</sub>	Tol. d <sub>3</sub>	a máx.	b ≡	d <sub>5</sub> min.	n min.	g máx.	K (kgf/mm)	d <sub>2</sub>	Tol. d <sub>2</sub>	m	t	Peso kg/100	Código DOBER
3	0,40		2,7		1,9	0,8	1,0	0,3	0,5	206	2,8	+0	0,5	0,10	0,017	030030040
4	0,40		3,7	+0,04	2,2	0,9	1,0	0,3	0,5	193	3,8	+0	0,5	0,10	0,022	030040040
5	0,60		4,7	-0,15	2,5	1,1	1,0	0,3	0,5	738	4,8	-0,048	0,7	0,10	0,066	030050060
6	0,70		5,6		2,7	1,3	1,2	0,5	0,5	1040	5,7	(h10)	0,8	0,15	0,084	030060070
7	0,80		6,5		3,1	1,4	1,2	0,5	0,5	1475	6,7		0,9	0,15	0,121	030070080
8	0,80		7,4	+0,06	3,2	1,5	1,2	0,6	0,5	1420	7,6	+0	0,9	0,20	0,158	030080080
9	1,00		8,4	-0,18	3,3	1,7	1,2	0,6	0,5	3000	8,6	-0,06	1,1	0,20	0,300	030090100
10	1,00		9,3		3,3	1,8	1,5	0,6	1,0	2820	9,6		1,1	0,20	0,340	030100100
11	1,00		10,2		3,3	1,8	1,5	0,8	1,0	2610	10,5		1,1	0,25	0,410	030110100
12	1,00		11,0		3,3	1,8	1,7	0,8	1,0	2400	11,5		1,1	0,25	0,500	030120100
13	1,00		11,9		3,4	2,0	1,7	0,9	1,0	2320	12,4		1,1	0,30	0,530	030130100
14	1,00		12,9	+0,10	3,5	2,1	1,7	0,9	1,0	2290	13,4	+0	1,1	0,30	0,640	030140100
15	1,00		13,8	-0,36	3,6	2,2	1,7	1,1	1,0	2160	14,3	-0,11	1,1	0,35	0,670	030150100
16	1,00		14,7		3,7	2,2	1,7	1,2	1,0	2100	15,2	(h11)	1,1	0,40	0,700	030160100
17	1,00		15,7		3,8	2,3	1,7	1,2	1,0	2160	16,2		1,1	0,40	0,820	030170100
18	1,20		16,5		3,9	2,4	2,0	1,5	1,5	3710	17,0		1,3	0,50	1,110	030180120
19	1,20		17,5		3,9	2,5	2,0	1,5	1,5	3640	18,0		1,3	0,50	1,220	030190120
20	1,20		18,5		4,0	2,6	2,0	1,5	1,5	3630	19,0		1,3	0,50	1,300	030200120
21	1,20		19,5	+0,13	4,1	2,7	2,0	1,5	1,5	3540	20,0	-0,13	1,3	0,50	1,420	030210120
22	1,20		20,5	-0,42	4,2	2,8	2,0	1,5	1,5	3540	21,0	(h11)	1,3	0,50	1,500	030220120
23	1,20		21,5		4,3	2,9	2,0	1,5	1,5	3470	22,0		1,3	0,50	1,630	030230120
24	1,20		22,2		4,4	3,0	2,0	1,7	1,5	3340	22,9		1,3	0,55	1,770	030240120
25	1,20		23,2	-0,06	4,4	3,0	2,0	1,7	1,5	3340	23,9		1,3	0,55	1,900	030250120
26	1,20		24,2		4,5	3,1	2,0	1,7	1,5	3290	24,9		1,3	0,55	1,960	030260120
27	1,20		24,9		4,6	3,1	2,0	2,1	1,5	3340	25,6		1,3	0,70	2,080	030270120
28	1,50		25,9	+0,21	4,7	3,2	2,0	2,1	1,5	6500	26,6	-0,21	1,6	0,70	2,920	030280150
29	1,50		26,9	-0,42	4,8	3,4	2,0	2,1	1,5	6400	27,6	(h12)	1,6	0,70	3,200	030290150
30	1,50		27,9		5,0	3,5	2,0	2,1	1,5	6420	28,6		1,6	0,70	3,310	030300150
31	1,50		28,6		5,1	3,5	2,5	2,6	2,0	6280	29,3		1,6	0,85	3,450	030310150
32	1,50		29,6		5,2	3,6	2,5	2,6	2,0	6180	30,3		1,6	0,85	3,540	030320150
33	1,50		30,5		5,2	3,7	2,5	2,6	2,0	6220	31,3		1,6	0,85	3,690	030330150
34	1,50		31,5		5,4	3,8	2,5	2,6	2,0	6130	32,3		1,6	0,85	3,800	030340150
35	1,50		32,2	+0,25	5,6	3,9	2,5	3,0	2,0	6010	33,0	-0,25	1,6	1,00	4,000	030350150
36	1,75		33,2	-0,50	5,6	4,0	2,5	3,0	2,0	9580	34,0	(h12)	1,8	1,00	5,000	030360175
37	1,75		34,2		5,7	4,1	2,5	3,0	2,0	9640	35,0		1,8	1,00	5,370	030370175
38	1,75		35,2		5,8	4,2	2,5	3,0	2,0	9500	36,0		1,8	1,00	5,620	030380175
39	1,75		36,0	+0,39	5,9	4,3	2,5	3,0	2,0	9520	37,0		1,8	1,00	5,850	030390175
40	1,75		36,5	-0,90	6,0	4,4	2,5	3,8	2,0	9700	37,5		1,8	1,25	6,030	030400175

Material: Aço mola beneficiado.  
Acabamento: Fosfatizado.

Outras medidas, materiais e acabamentos sob encomenda.

Fonte: Dober (2019)

**ANEXO 5 – ESPECIFICAÇÃO DA RODA MOTORA**



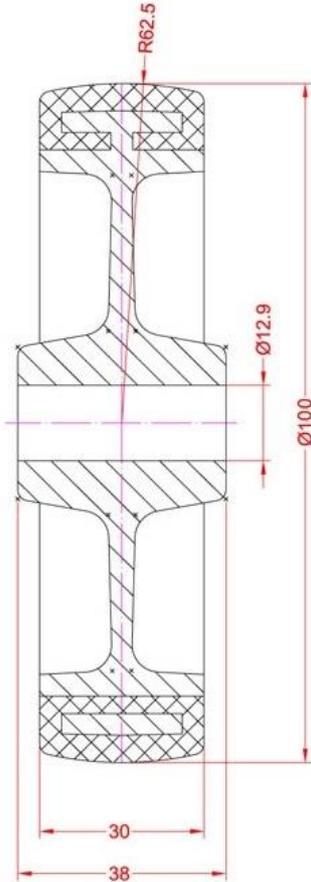
**Novex**  
Sinônimo de Rodas e Rodízios

Bienvenido al mundo de Ruedas



**R 512 UPF**

- Descrição Completa: Roda R 512 UPF
- Capacidade de Carga (kg): 100
- Tipo de Mancal: "F" - Furo Passante
- Diâmetro: 100 mm
- Largura da Roda (mm): 30
- Diâmetro do Eixo: 1/2"
- Diâmetro sem Manga: Não se aplica
- Comprimento do Cubo (mm): 38
- Temperatura: -20 A +70 °C
- Dureza Superior Rodagem: 95 Shore "A"
- Condutividade: Não
- Indicado para umidade: Sim
- Peso da peça (kg): 0.216





U - Poliuretano termoplástico, cor marrom  
Para rodas da Série UP

**CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES TÉCNICAS PARA APLICAÇÃO**

**Maior resistência à abrasão e ao rasgo. Suporta maior movimentação e impactos. Apresenta boa performance em diversos tipos de pisos de superfície lisa.**

Dureza (Shore) ASTM D2240	Tensão Ruptura (mín. MPa) ASTM D412	Alongamento (mín. %) ASTM D412	Densidade (g/cm³) ASTM D297	Deformação permanente (máx. %) ASTM D395B	Resistência ao rasgo (mín. kN/m) ASTM D624	Resistência (mín. %) DIN 53512	Abrasão (máx. mm) DIN 53516
95 *A*	45 DIN 53504	500 DIN 53504	1,22	40 DIN 53517	80 DIN 53515		40

Fonte: Novex (2019)

## ANEXO 6 – ESPECIFICAÇÃO DA RODA BOBA

**Novex**  
Sinônimo de Rodas e Rodízios

Bienvenido al mundo de Ruedas

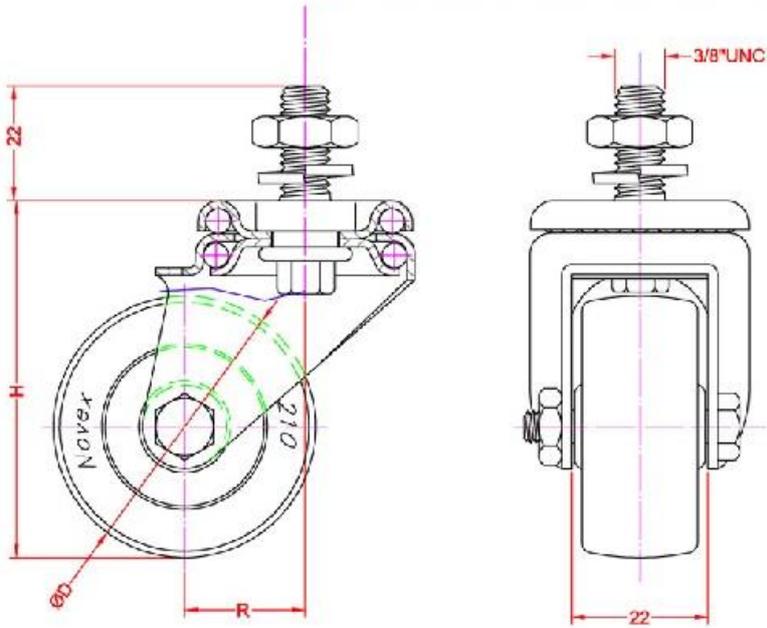


**GH 210 GTF**  
■ Descrição Completa: Rodízio GH 210 GTF

**Dados Técnicos**

- Capacidade de Carga (kg): 45
- Dimensão do Furo (mm): -
- Material da Roda: "GT" - Gel, resina termoplástica transparente
- Tipo de Mancal: "F" - Furo Passante
- Altura da Espiga: 22mm
- Diâmetro: 2" / 50mm
- Largura da Roda (mm): 22
- Temperatura: -10 A +50 °C
- Dureza Superior Rodagem: 75 Shore "A"
- Condutividade: Não
- Peso da peça (kg): 0.202
- Dimensão da Espiga: NC 3/8"
- Fixo/Giratório: Giratório
- Tipo de Fixação: Espiga
- Furação (mm): Não se aplica - fixação por espiga
- Dimensão da Placa (mm): Não se aplica - fixação por espiga

REFERENCIA	H	R	ØD
GH 210	66	24	50
GH 310	93	25.5	75



Fonte: Novex (2019)

## ANEXO 7 – ESPECIFICAÇÃO DA BATERIA

### Bateria Estacionária VRLA 12V 6,4Ah Mod.UP1270SEG



#### Informações Técnicas

<b>Modelo</b>	UP1270SEG
<b>Tensão Nominal (V)</b>	12
<b>Capacidade (C10)</b>	5,8
<b>Capacidade (C20)</b>	6,4
<b>Comprimento (mm)</b>	151
<b>Largura (mm)</b>	65
<b>Altura Total (mm)</b>	100
<b>Peso (kg)</b>	1,50
<b>Tipo Terminal</b>	Faston 187
<b>Garantia (meses)</b>	12
<b>Certificações</b>	UL

## ANEXO 8 – COEFICIENTE DE ATRITO DE ROLAMENTO

**TABELA 6.1** Coeficientes de atrito

Material	Estático	Cinético	Rolamento
	$\mu_e$	$\mu_c$	$\mu_r$
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: *Randall D. Knight*

Fonte: Knight (2009)