

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**VICTOR SANTOS REBELLO**

**READEQUAÇÃO TECNOLÓGICA DE PUNHO ROBÓTICO DE CADEIA  
CINEMÁTICA PARALELA**

**FLORIANÓPOLIS, 2019**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**VICTOR SANTOS REBELLO**

**READEQUAÇÃO TECNOLÓGICA DE PUNHO ROBÓTICO DE CADEIA  
CINEMÁTICA PARALELA**

Trabalho de conclusão de Curso  
submetido ao Instituto Federal de  
Santa Catarina como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
engenheiro mecatrônico.

Orientador:  
Prof. Dr. Eng. Nelso Gauze Bonacorso

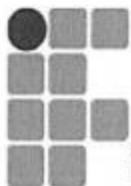
**FLORIANÓPOLIS, 2019**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Rebello, Victor Santos  
READEQUAÇÃO TECNOLÓGICA DE PUNHO ROBÓTICO DE CADEIA  
CINEMÁTICA PARALELA / Victor Santos Rebello ; orientação de  
Nelso Gauze Bonacorso. - Florianópolis, SC, 2020.  
34 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado  
em Engenharia Mecatrônica. Departamento  
Acadêmico de Metal Mecânica.  
Inclui Referências.

1. Readequação. 2. Soldagem automática. 3. Modularidade.  
4. Robustez mecânica. I. Bonacorso, Nelso Gauze.  
II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento  
Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.



INSTITUTO FEDERAL  
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

## DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o estudante **Victor Santos Rebello**, matrícula nº **1510006605**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **Readequação Tecnológica de Punho Robótico de Cadeia Cinemática Paralela**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 16 de DEZEMBRO de 2019.

Prof. Orientador do TCC: Nelso Gauze Bonacorso

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, professor Nelso Gauze Bonacorso, pela oportunidade e disposição. Aos técnicos do Laboratório de Máquinas Operatrizes pela ajuda durante a fabricação.

Agradeço a minha família e amigos, por todo o apoio e suporte.

E um agradecimento especial aos meus parceiros de Projeto Integrador por participarem dessa caminhada.

## RESUMO

A soldagem é um processo amplamente difundido na união de componentes metálicos para as mais diversas finalidades. Pela natureza, a soldagem manual, é um processo insalubre que causa danos ao soldador. A automação desse processo não só reduz os danos ao operador, que não precisa operar a tocha, mas também adiciona qualidade e repetibilidade nas soldas além de incrementar a produtividade do processo. Tendo em vista a importância da automação da solda e as vantagens para a área didática e de pesquisa foi desenvolvido um manipulador cartesiano de cadeia cinemática mista de cinco graus de liberdade. Porém, com o tempo, as viagens e as montagens e desmontagens do manipulador, o equipamento sofreu desgastes que o impediram de continuar as operações. A fim de manter a pesquisa e o estudo da solda utilizando o manipulador foi proposta a readequação mecânica de todo o manipulador por meio de dois trabalhos de conclusão de curso. A concepção da readequação do punho do manipulador visa a modularização e compactação e é o tema do presente trabalho de conclusão de curso. Dada a complexidade do projeto decidiu-se utilizar o modelo de processo de desenvolvimento integrado de produtos para obter a solução mais adequada. A avaliação experimental do punho foi realizada conforme as peças eram fabricadas. Concluída a montagem do punho prosseguiu-se para os testes que foram definidos para avaliar o seu funcionamento, os testes de parametrização e de operação de “home”. A readequação do punho do manipulador cartesiano atendeu aos requisitos de projeto. Pode-se destacar que o conjunto de pequeno volume e peso, menor número de peças e a modularidade tornam o punho mais robusto para trabalho, transporte e utilização no ensino e pesquisa.

Palavras-chave: Readequação. Soldagem automática. Modularidade. Robustez Mecânica.

## **ABSTRACT**

The welding is a widespread process for the union of metallic components for a variety of goals. By its nature, manual welding, is an unhealthy process that causes damage to the welder. The automation of this process don't just reduce the damage to the welder, which don't operate the torch, but also adds quality and repetitivity to the weld bead as well as increasing the process productivity. In view of the value of welding automation and its benefits for the didactic and research areas, a cartesian manipulator with mixed kinematic chain of five degrees of freedom was developed. However, with time, travels, assembles and disassembles of the manipulator, the equipment suffered mechanical wear which prevented it from continuing its operations. To keep the research and the study of welding by using the manipulator it was proposed to do a mechanical retrofit of the whole manipulator through two final papers. The conception of retrofitting the manipulator wrist aim for a modular and compact design and is the subject of this paper. Given the complexity of the project the PRODIP method of project development process was adopted for reaching the most adequate solution. The experimental evaluation of the wrist and its parts were performed as they were manufactured. As the wrist was assembled it proceeded to the tests defined to check its operation, the tests of parametrization and home operation. The cartesian manipulator's wrist retrofit met the project requirements. It can be highlighted that the set of low volume and weight, fewer number of parts, and the modular design gives the wrist robustness to work, travel and for teaching and research.

Keywords: Retrofit. Automatic Welding. Modularity. Mechanical Robustness.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Definição do problema.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 “Retrofit” .....	5
2.2 Soldagem à arco elétrico .....	5
2.3 Robôs e manipuladores.....	6
2.4 Transmissão de movimento.....	9
2.5 Soluções prévias.....	11
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>15</b>
3.1 Projeto Informacional.....	13
3.2 Projeto Conceitual.....	14
3.3 Projeto preliminar e detalhado.....	20
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>25</b>
4.1 Parametrização.....	27
4.2 Teste de operação de “home” .....	28
4.3 Requisitos de projeto.....	29
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>33</b>

## LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Processo GMAW, em (a) manual e em (b) automático.....	1
Figura 2 - Braço mecânico, em (a) o modelo CAD e em (b) o protótipo de cinco eixos XZYAB.....	3
Figura 3 - “Retrofit”, reforma e atualização .....	5
Figura 4 - Processo de soldagem .....	6
Figura 5 - Componentes de um sistema de solda MIG/MAG .....	6
Figura 6 - Juntas e elos de braços robóticos .....	7
Figura 7 - Partes de um robô.....	8
Figura 8 - Robô cartesiano de fresagem .....	8
Figura 9 - Roll, pitch e yaw .....	9
Figura 10 - Arranjos série na esquerda (a) e série-paralelo na direita (b) de trem de engrenagem .....	10
Figura 11 - Diferencial.....	11
Figura 12 - Protótipo do braço robótico.....	11
Figura 13 - (a) Desenhos CAD da readequação do punho, (b) comparação da readequação com primeira versão .....	12
Figura 14 - Modelo PRODIP .....	13
Figura 15 - Função Global do Sistema .....	15
Figura 16 - Transmissão diferencial (a) “pitch”, (b) “roll” .....	19
Figura 17 - Trem de engrenagens arranjo série.....	20
Figura 18 - Sistema de transmissão diferencial .....	21
Figura 19 - Transmissão de movimento .....	22
Figura 20 - Engrenagens da transmissão de movimento .....	22
Figura 21 - Engrenagens segundo estágio .....	23
Figura 22 - Motor CC GR42x25 com “encoder” R30.....	23
Figura 23 - Base do punho .....	24
Figura 24 - Proteção do punho a direita projetada (a) e a esquerda impressa (b).....	24
Figura 25 - Punho montado vista frontal (a), vista lateral (b) .....	25
Figura 26 - Módulo Eletrônico .....	26
Figura 27 - Gráfico de resposta do torque do motor.....	27
Figura 28 - Gráfico de movimentação para parametrização.....	28
Figura 29 - (a) Posição inicial de operação .....	28

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01 - Requisitos de projeto .....</b>	<b>14</b>
<b>Tabela 02 - Estrutura Funcional .....</b>	<b>15</b>
<b>Tabela 03 - Matriz Morfológica .....</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 04 - Combinações de soluções da matriz morfológica .....</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 05 - Avaliação de concepções .....</b>	<b>18</b>
<b>Tabela 06 - Combinação de soluções mais adequada .....</b>	<b>19</b>
<b>Tabela 07 - Requisitos de projeto x resultados alcançados .....</b>	<b>29</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem é um processo amplamente difundido na união de componentes metálicos para as mais diversas finalidades. Por ser um processo simples e econômico, que requer pouca adição de material, a soldagem é um dos principais processos na união de peças. Existe uma diversidade de aplicações da soldagem como na construção naval, estruturas civis, vasos de pressão, tubulações, usinas hidrelétricas, materiais ferroviários e metrô, entre outros, além da aplicação em reparos e manutenções (RIBEIRO, 2001).

Pela natureza, a soldagem manual, Figura 01a, é um processo insalubre que causa danos ao soldador. A automação desse processo, Figura 01b, não só reduz os danos ao operador, que não precisa operar a tocha, mas também adiciona qualidade e repetibilidade nas soldas além de incrementar a produtividade do processo.

Figura 1 - Processo GMAW, em (a) manual e em (b) automático



Fonte: (a) Wikipedia, (b) Robotics.org

Segundo (ELDERFIELD & HALL, 2015) a automação da soldagem é dividida em duas categorias básicas, semi-automática e totalmente automática. Na soldagem semi-automática o operador posiciona a peça na mesa para ser soldada. O equipamento então controla a movimentação da tocha e os parâmetros da soldagem a fim de garantir a qualidade, e a repetibilidade da solda. Ao fim do processo o operador retira a peça e reinicia o ciclo.

Na soldagem totalmente automática o processo é operado por uma máquina específica ou um conjunto de máquinas que posiciona a peça, controla a posição e

movimentação da tocha, monitora a qualidade da solda e retira a peça finalizada. Dependendo da operação pode ou não haver um operador.

A automação do processo de soldagem adiciona vários benefícios como melhora da qualidade da solda, tendo soldas mais uniformes e com melhor repetibilidade, além da redução dos retrabalhos e de sucatas. Aumento no volume de produção, dado a maior velocidade de soldagem.

Porém essas vantagens têm seu preço, como investimento inicial alto, máquinas novas possuem alto custo e quanto mais automatizada forem as máquinas mais seus preços ficam proibitivos. A flexibilidade da máquina e ciclo de vida do produto são fatores importantes, é crucial considerar o ciclo de vida do produto antes de investir na automatização do processo, máquinas semi-automáticas são mais flexíveis porém equipamentos de soldagem automáticos podem não se adequar às mudanças no processo.

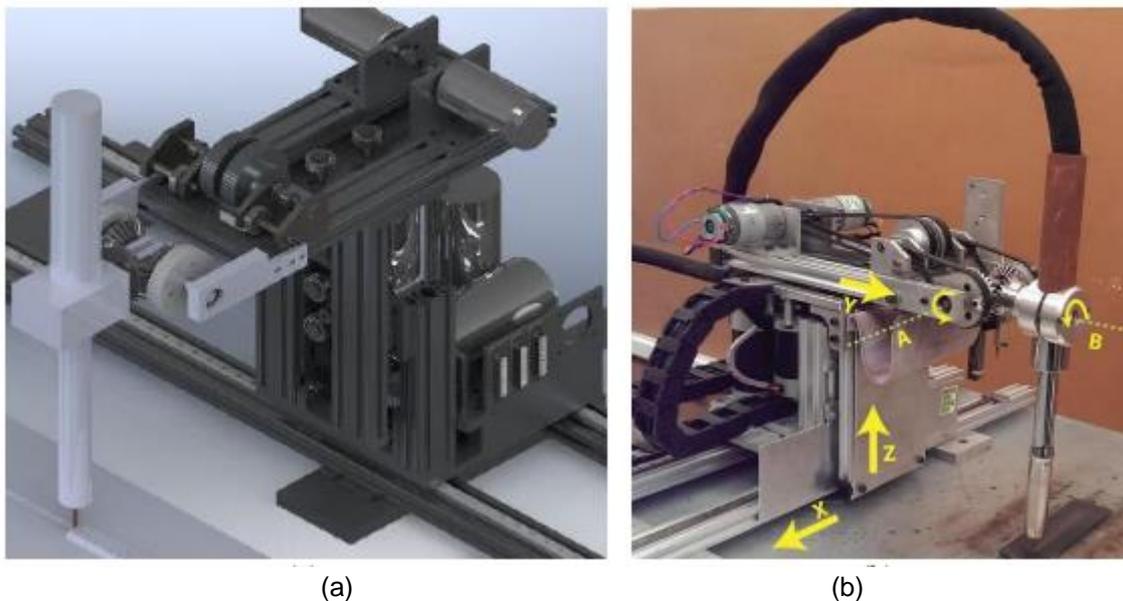
Com intuito de modernizar a linha de fabricação sem arcar com os altos custo de um novo equipamento faz-se uso da readequação de um equipamento. O procedimento no contexto industrial, o “*retrofit*” de máquinas, é a reforma e modernização do equipamento. As características básicas da máquina não se modificam, mas ela estará apta a funcionar e ser mais produtiva por mais tempo (FERSILTEC, 2017).

Este trabalho tem como objetivo realizar a readequação mecânica de um punho robótico de cadeia cinemática paralela. Na metodologia será feito uso do modelo PRODIP, processo de desenvolvimento de produto, na avaliação das soluções dos requisitos de projeto. Serão apresentadas as soluções escolhidas e as peças fabricadas de acordo com os requisitos de projeto. Além dos testes com o punho montado.

## 1.1 Definição do problema

Tendo em vista a importância da automação da solda e as vantagens para a área didática e de pesquisa foi desenvolvido um manipulador cartesiano de cadeia cinemática mista de cinco graus de liberdade por HURBERT (2014) e PIRES (2014), como mostra Figura 02. O equipamento foi capaz de atender e repetir com exatidão os comandos recebidos e realizar solda com excelente acabamento.

Figura 2 - Braço mecânico, em (a) o modelo CAD e em (b) o protótipo de cinco eixos XZYAB



Fonte: Hurbert et al (2014)

Porém, com o tempo, as viagens e as montagens e desmontagens do manipulador, o equipamento sofreu desgastes que o impediram de continuar as operações. A fim de manter a pesquisa e o estudo da solda utilizando o manipulador foi proposta a readequação mecânica de todo o manipulador por meio de dois trabalhos de conclusão de curso (TCC).

A concepção da readequação do punho do manipulador visa a modularização e compactação, é o tema do presente TCC. A modularização torna o punho uma peça única que facilita a montagem e desmontagem ao braço do manipulador, além de facilitar a vedação e a proteção dos engrenamentos internos da transmissão de movimento contra respingos e salpicos do processo de soldagem. A compactação tem como vantagens a diminuição do volume total do punho, além de um engrenamento de menor volume. A redução do número de peças, diminui a necessidade de elementos de união que podem causar folgas e ruídos. O uso de materiais mais leves, como o alumínio, resulta na redução do peso do punho.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

- Readequar um punho robótico de cadeia cinemática paralela para integrar a um manipulador cartesiano de soldagem.

### 1.2.2 Objetivos específicos

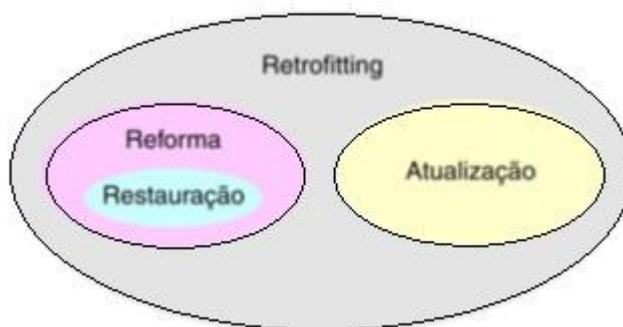
- Projetar e construir os redutores mecânicos entre os motores e a transmissão diferencial;
- Projetar e construir a estrutura mecânica do punho e suas proteções para respingos e salpicos;
- Testar e avaliar o funcionamento do punho robótico com tocha de soldagem instalada;
- Testar e avaliar o funcionamento da operação de “*home*” dos eixos do punho;
- Documentar a readequação tecnológica e publicar seus resultados.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 “Retrofit”

Segundo Pansiera (2002), temos três conceitos importantes quanto a recuperação de um equipamento, a reforma, a atualização e o “*retrofit*” ou readequação, Figura 03. A reforma é um conjunto de atividades a fim de recuperar os danos na máquina causados pelo tempo e pela utilização. A atualização visa a adequação do equipamento à nova demanda. O “*retrofit*” é a combinação da reforma com a atualização de forma que o equipamento não só esteja em boas condições de funcionamento como também possa atender às novas demandas.

Figura 3 - “Retrofit”, reforma e atualização



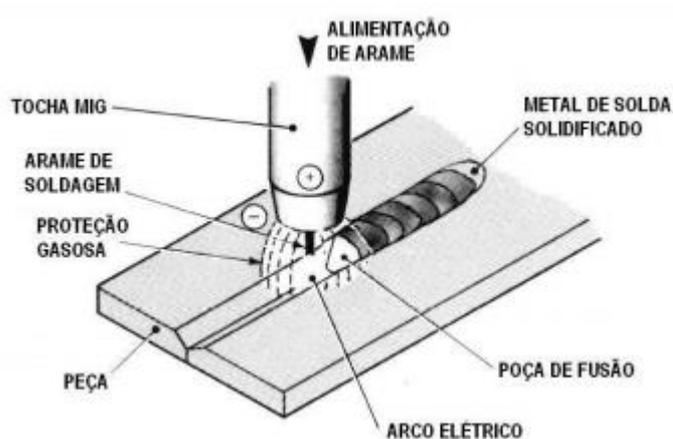
Fonte: Pansiera (2002)

A principal vantagem do “*retrofit*” é seu custo benéfico. O custo de novos equipamentos são, em geral, proibitivos. Com a readequação de equipamentos antigos, mantendo as partes em boas condições, substituindo as que forem necessário e atualizando suas partes eletroeletrônicas e de segurança, tem-se uma solução mais barata que garante sobrevida ao equipamento (FERSILTEC, 2017).

### 2.2 Soldagem a arco elétrico

GMAW (Gas Metal Arc Welding) é um processo de soldagem que faz a união de metais aquecendo-os até seu ponto de fusão utilizando um arco elétrico, representado na Figura 04. O arco ocorre entre um eletrodo, contínuo e consumível e o metal a ser soldado. O arco é protegido de contaminantes por um gás (MILLER, 2012).

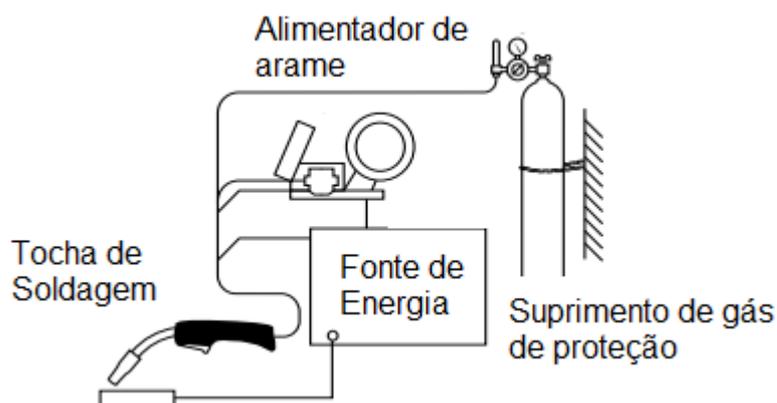
**Figura 4 - Processo de soldagem**



Fonte: ESAB BR

A composição básica para um sistema de soldagem MIG/MAG industrial possui quatro componentes principais, a fonte de energia, o alimentador de arame, a tocha de soldagem e o cilindro de gás, todos com seus respectivos acessórios, apresentados na Figura 05 (LINCOLNELECTRIC, 2014).

**Figura 5 - Componentes de um sistema de solda MIG/MAG**



Fonte: Adaptada de LincolnElectric

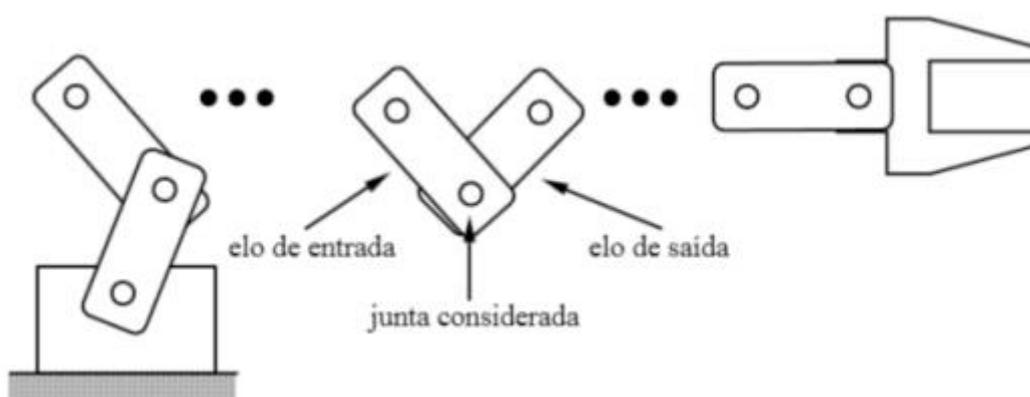
### 2.3 Robôs e manipuladores

A história da automação industrial é marcada por períodos de rápidas mudanças nos métodos usuais, tanto como causa ou, talvez, efeito. Esses períodos de mudanças nas técnicas de automação parecem intimamente ligadas à economia mundial. A adoção de equipamentos robóticos nas indústrias do mundo tem crescido, sendo o principal fator a redução dos custos. Durante a década de 1990, o preço dos robôs diminuiu enquanto o custo da mão de obra aumentou. Levando em conta que os equipamentos robóticos estão mais eficazes, rápidos,

precisos e flexíveis a redução do custo é ainda maior que a redução de seu preço. (CRAIG, 2005).

Os robôs e os manipuladores são dispositivos de posicionamento formado por cadeias de elos, em série e/ou paralelo, interligados através de juntas, cuja extremidade é fixada a uma ferramenta ou dispositivo com o qual é realizada uma tarefa, como mostra a Figura 06. As juntas possuem dois tipos básicos, prismático (translação) e rotacional (rotação), elas também determinam os graus de liberdade do mecanismo. Assim um manipulador robótico pode ser classificado quanto ao tipo dos movimentos realizados, sendo os robôs cartesianos, SCARA e antropomórfico alguns exemplos. (VALE, 2011).

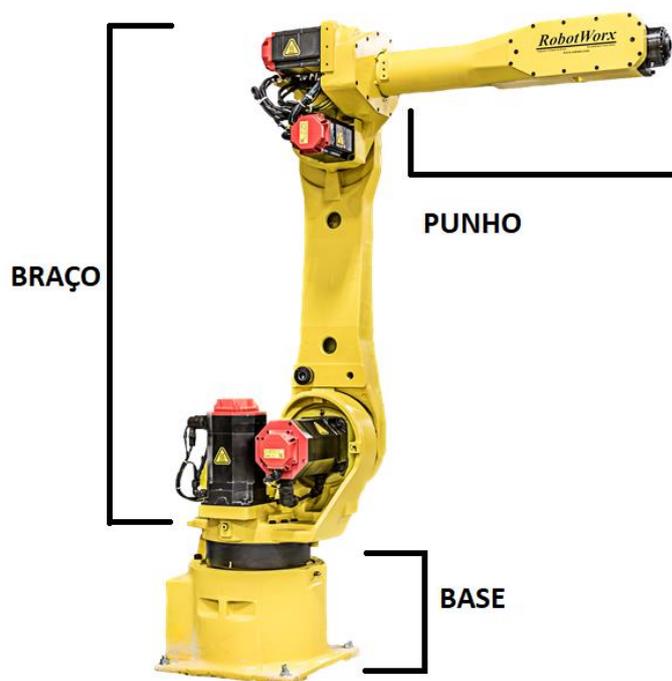
**Figura 6 - Juntas e elos de braços robóticos**



Fonte: Groover (1988).

De acordo com Groover (1988), um braço robótico é constituído de três partes, como apresenta a Figura 07, o braço, que consiste na união de juntas e elos e que faz a ligação entre a base e o punho. O punho que pode ser formado por várias juntas, que orientam o órgão terminal. O órgão terminal que é posicionado na extremidade do punho, podendo ser uma mão, ferramenta, entre outros, para a realização da tarefa requerida pela aplicação.

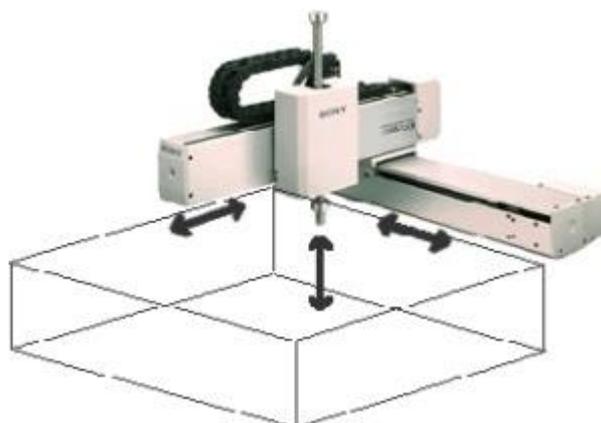
**Figura 7 - Partes de um robô**



Fonte: Adaptado de *RobotWorx*

Segundo VALE (2011), robôs cartesianos, Figura 08, estão presentes em indústrias por sua funcionalidade no posicionamento estratégico de objetos em um sistema de coordenadas espaciais. Robôs realizam tarefas, que exigem rapidez e precisão, de transporte e/ou posicionamento.

**Figura 8 - Robô cartesiano de fresagem**

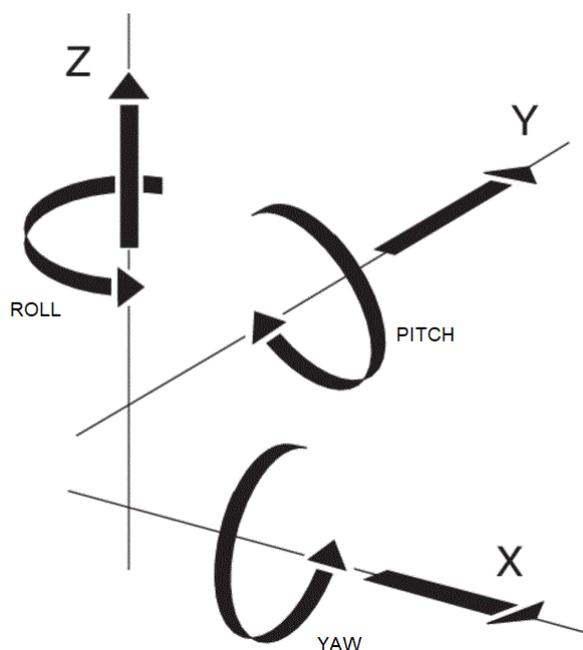


Fonte: Collins (2018)

Os punhos são compostos de 2 ou 3 graus de liberdade. As juntas dos punhos são agrupadas num pequeno volume de forma a não movimentar o órgão terminal em demasia ao serem acionadas. Em particular, o movimento do punho possui nomenclaturas específicas, roll ou rolamento, rotação do punho em torno do braço, pitch ou arfagem, rotação do punho para cima ou para baixo, e yaw ou guinada - rotação do punho para a esquerda e para a direita (CARRARA, 2016, p. 11).

A Figura 09 apresenta as rotações em torno dos eixos.

**Figura 9 - Roll, pitch e yaw**



Fonte: Adaptado de Newport

## 2.4 Transmissão de movimento

Os mecanismos de transmissão de movimento são divididos em duas categorias, contato direto e ligação intermediária. No contato direto temos a transmissão do movimento através do contato entre as superfícies dos órgãos motor e movido. Na ligação intermediária a transmissão ocorre por um corpo intermediário aos órgãos motor e movido. Essa transmissão pode ser feita por um mecanismo de quatro barras, no caso de uma transmissão rígida, ou por polias, correias ou correntes, para as transmissões flexíveis (FLORES e GOMES, 2014).

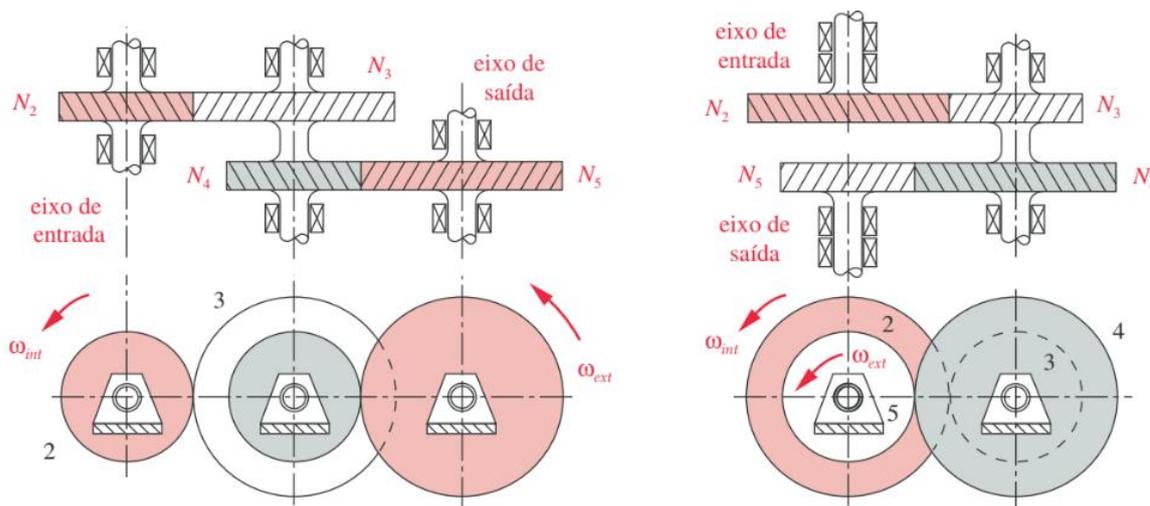
Engrenagens são rodas com dentes padronizados, em relação à forma e ao tamanho, que servem para transmitir velocidade angular e torque (NORTON, 2013). As engrenagens são amplamente aplicadas, dada sua padronização e versatilidade nos ganhos, e nos sentidos de rotação.

Engrenagens cilíndricas de dentes retos possuem dentes paralelos ao eixo de rotação e são utilizadas para transmitir movimento de um eixo, paralelo ao primeiro. De todos os tipos, a engrenagem cilíndrica de dentes retos é a mais simples e, por essa razão, utilizada para desenvolver as relações cinemáticas primárias na forma de dente. (SHIGLEY, 2011, p. 680).

Ainda segundo SHIGLEY (2011), quando há a transmissão de movimento por eixos que se interceptam é utilizado algum tipo de engrenagem cônica. As engrenagens cônicas podem ser feitas com quase qualquer ângulo entre eixos, sendo o ângulo de  $90^\circ$  o mais comum.

“Um trem de engrenagens é qualquer coleção de duas ou mais engrenagens acopladas. Um par de engrenagens é, portanto, a forma mais simples de um trem de engrenagens e usualmente está limitado a uma razão de cerca de 10:1” (NORTON, 2013, p. 696). Para razões maiores que 10:1 precisamos compor um trem de engrenagens composto, onde ao menos um eixo possui mais de uma engrenagem. Esse trem terá um arranjo paralelo ou série-paralelo, representados na Figura 10.

**Figura 10 - Arranjos série na esquerda (a) e série-paralelo na direita (b) de trem de engrenagem**



Fonte: Norton (2013)

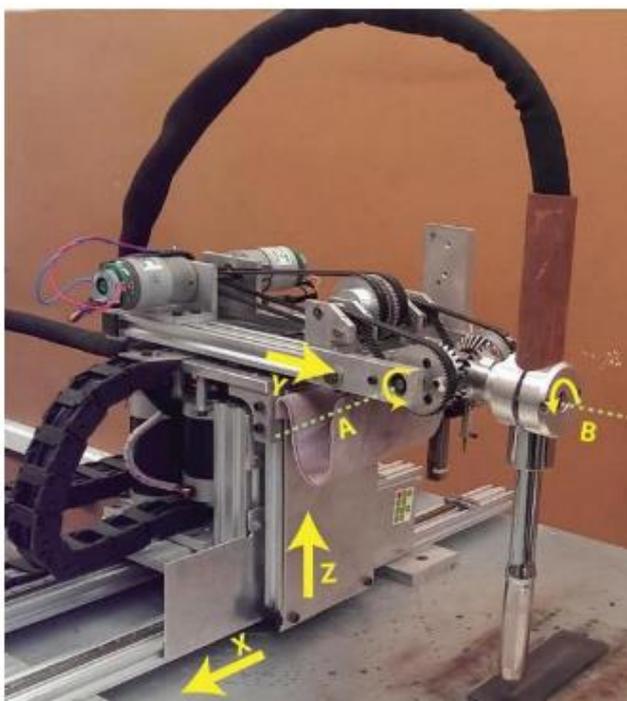
Um diferencial, mostrado na Figura 11, possui duas funções principais, transmitir o movimento de um único eixo motor para dois eixos movidos e permitir a rotação independente dos dois eixos movidos (CHOCHOLEK, 1988).

**Figura 11 - Diferencial**

Fonte:Wikipedia

## 2.5 Soluções prévias

O manipulador cartesiano de cadeia cinemática mista desenvolvido por HUBERT(2014) e PIRES(2014) é um robô cartesiano de 3 eixos com um punho de cadeia cinemática paralela acoplado, Figura 12. O punho utiliza 2 pares de correias, de razão total 36:1, para cada engrenagem motora do sistema diferencial realizando a movimentação da tocha de soldagem.

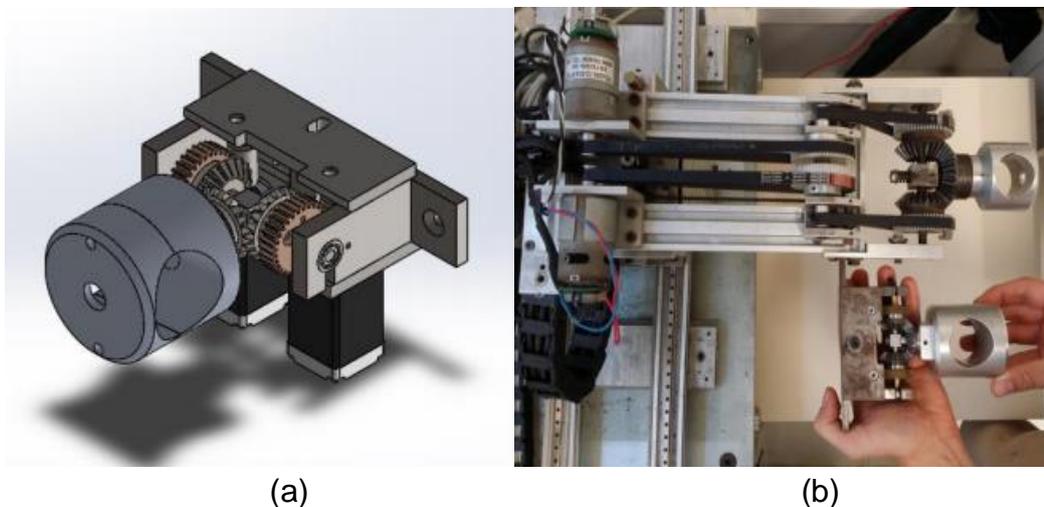
**Figura 12 - Protótipo do braço robótico**

Fonte: Hubert et al (2014)

Essa solução para o punho é volumosa, as partes do punho se estendem por todo o comprimento do eixo Y. O maior número de componentes aumenta a probabilidade de surgir folgas e vibração. A utilização de correias, dada a sua elasticidade, também aumenta o risco de folgas.

Após o fim das operações do manipulador foi feita uma pesquisa por MEDEIROS et al(2017) com a finalidade de readequar o manipulador. A readequação do punho contou com a modularidade do punho, a diminuição do número de componentes, modificação no sistema de transmissão, utilizando parafusos sem-fim, de razão 60:1, e redução do tamanho do sistema diferencial Figura 13a. Na Figura 13b tem-se a comparação da readequação com a primeira versão.

**Figura 13 - (a) Desenhos CAD da readequação do punho, (b) comparação da readequação com primeira versão**



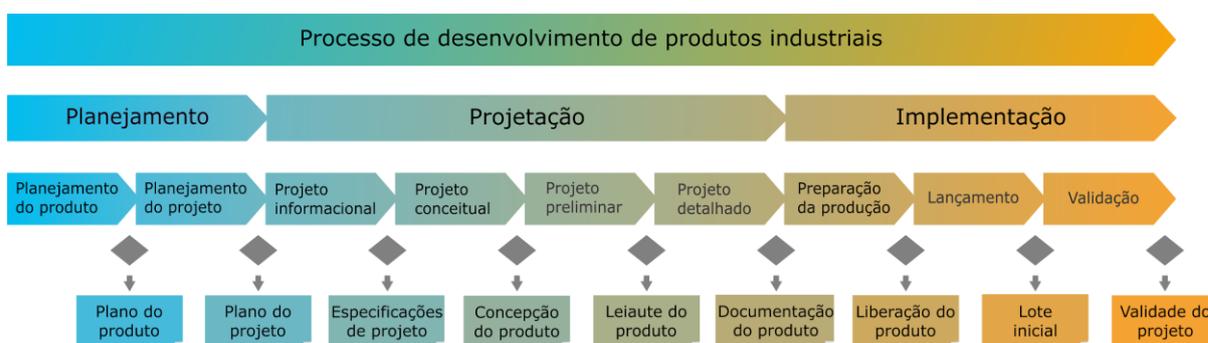
Fonte: Medeiros et al (2017)

Essa solução acabou não sendo implementada, o punho teve como problemas o peso, dado que a base estrutural era feita de aço e a transmissão com parafuso sem-fim apresentava folga excessiva.

### 3. METODOLOGIA

Dada a complexidade do projeto decidiu-se utilizar o modelo de processo de desenvolvimento integrado de produtos (PRODIP) para obter a solução mais adequada. A Figura 14 apresenta a sequência do modelo PRODIP. Por se tratar de uma readequação de um projeto pronto e implementado, o processo será iniciado a partir do projeto informacional da projeção.

**Figura 14 - Modelo PRODIP**



Fonte: Ogliari (2019)

#### 3.1 Projeto informacional

Para obter as especificações necessárias no projeto informacional foram reunidos dados de robôs de solda comerciais. As principais limitações são máquinas para grandes produções que não são indicadas caso haja necessidade de serem transportadas ou de trabalhos confinados, e máquinas que são indicadas para tipos específicos de tarefas. A partir das soluções anteriores para o punho do manipulador e das necessidades do usuário, definiu-se os requisitos do usuário:

- Modular;
- Ser leve;
- Tamanho reduzido com poucos componentes;
- Facilidade de fabricação;
- Folga reduzida;
- Baixo custo;
- Rapidez no posicionamento da tocha;
- Trabalhar em qualquer posição de soldagem;
- Proteção contra respingos e salpicos de solda.

A fim de melhor entender esses requisitos e ter especificações de melhor qualidade, precisão e completeza esses dados são, então, transformados em características mensuráveis (BACK, 2008). Tendo assim os requisitos de projeto são mostrados na Tabela 01.

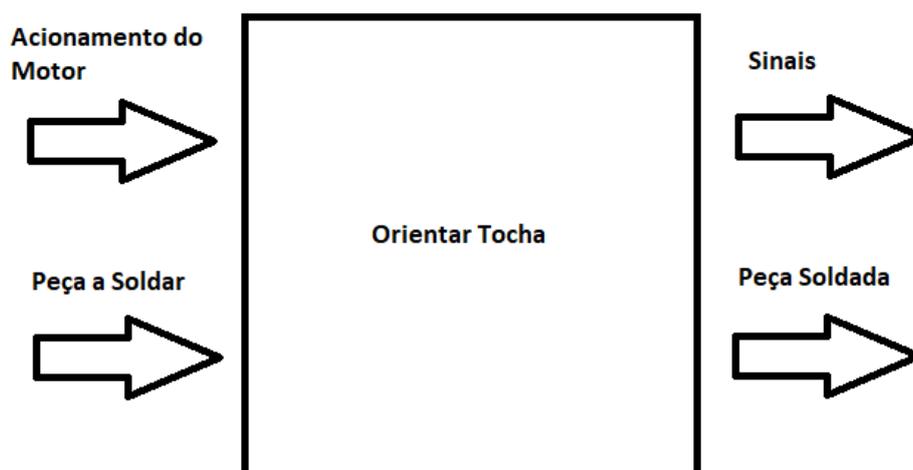
Tabela 01 - Requisitos de projeto

<b>Especificações</b>	<b>Meta</b>	<b>Aspectos indesejáveis</b>
Graus de liberdade	2 rotacionais	Baixa mobilidade da tocha
Resolução dos eixos rotativos	$\leq 0,05^\circ$	Orientação da tocha imprecisa
Transmitir com folgas mecânicas minimizadas	Sim	Mau funcionamento do equipamento
Velocidade de orientação da tocha	$\geq 100$ rpm	Posicionamento lento da tocha
Ser leve	$\leq 2$ kg	Esforços desnecessários no manipulador
Capacidade de Carga	$\leq 2$ kg	Não suportar o peso da tocha
Ser modular	Sim	Instalação do punho por partes
Proteção dos engrenamentos	Sim	Matéria estranha nos engrenamentos

### 3.2 Projeto conceitual

No projeto conceitual busca-se soluções que se adequem aos requisitos de projeto. Para isso é necessário compreender as funções as quais o produto será empregado. Inicialmente determina-se a função global do sistema para verificação das entradas e saídas conforme Figura 15.

Figura 15 - Função Global do Sistema



Fonte: Própria

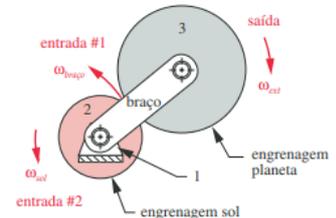
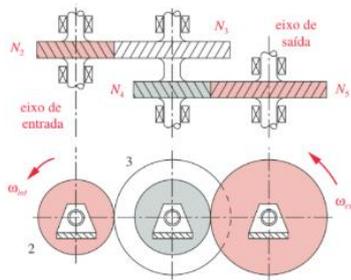
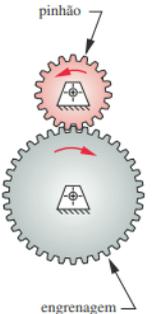
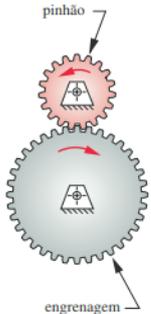
Através da estrutura funcional, Tabela 02, são estabelecidas as funções parciais do produto para a melhor compreensão das partes que o integram.

Tabela 02 - Estrutura Funcional

Função	Entrada	Saída
Orientar tocha	Tocha fora de orientação	Tocha orientada
Transmitir movimento	Movimento do motor	Movimento da tocha

O passo seguinte consiste na busca por soluções das funções elementares do projeto. Utilizando uma matriz morfológica, Tabela 03, podemos evidenciar as soluções encontradas para cada função e, então, criar combinações que possam ser comparadas a fim de encontrar a mais adequada.

Tabela 03 - Matriz Morfológica

Funções Parciais		
Orientar tocha	Transmitir movimento	
1	 <p>Engrenagem planetária</p>	 <p>Trem de engrenagens</p>
2	 <p>Engrenagem</p>	 <p>Engrenagem sem-fim</p>
3	 <p>Diferencial</p>	 <p>Correia e polia dentada</p>
4	 <p>Engrenagem sem-fim</p>	 <p>Engrenagem</p>

Para chegar ao resultado mais apropriado para o projeto faz-se a combinação das sugestões de solução de cada função parcial a partir da matriz morfológica. Com o objetivo de realizar a comparação foram escolhidas 3 combinações de sugestões de solução, apresentadas na Tabela 04.

**Tabela 04 - Combinações de soluções da matriz morfológica**

		Funções Parciais	
		Orientar tocha	Transmitir movimento
1	<p><b>Engrenagem planetária (A)</b></p>	<p><b>Trem de engrenagens (B)</b></p>	
2	<p><b>Engrenagem</b></p>	<p><b>Engrenagem sem-fim (A)</b></p>	
3	<p><b>Diferencial (B) (C)</b></p>	<p><b>Correia e polia dentada</b></p>	
4	<p><b>Engrenagem sem-fim</b></p>	<p><b>Engrenagem (C)</b></p>	

Tendo as combinações é feita a avaliação das concepções, Tabela 05. A pontuação das soluções são atribuídas a partir dos requisitos de projeto. A fim de realizar as comparações de forma imparcial utilizou-se a combinação C como referência. Com intuito de mensurar as comparações aplicou-se o seguinte critério em relação a referência:

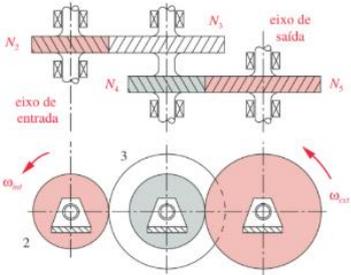
- +3 - Critério atendido imensamente melhor;
- +2 - Critério atendido muito melhor;
- +1 - Critério atendido melhor;
- 0 - Critério atendido tão bem quanto;
- -1 - Critério atendido pior;
- -2 - Critério atendido muito pior;
- -3 - Critério atendido imensamente pior;

**Tabela 05 - Avaliação de concepções**

Requisitos	Peso relativo	Concepções		
		A	B	C
Graus de liberdade	5	-1		REFERÊNCIA
Resolução dos eixos rotativos	5	+1	+2	
Transmissão com folgas mecânicas minimizadas	4		+1	
Velocidade de orientação da tocha	2	-2	-1	
Peso	2			
Capacidade de Carga	3	+3	+3	
Modular	3			
Proteção dos engrenamentos	2			
Volume de trabalho da tocha	4			
<b>Totais</b>		<b>+8</b>	<b>+23</b>	

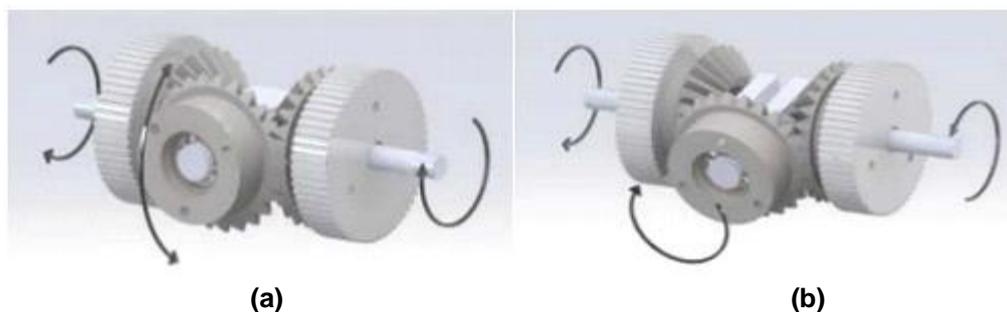
Com os resultados da tabela 05 é possível identificar que a solução mais adequada entre as concepções, conforme os requisitos de projeto e peso relativo, é a combinação B, apresentada na tabela HH.

**Tabela 06 - Combinação de soluções mais adequada**

Orientar tocha	Transmitir movimento
	
Transmissão diferencial	Trem de engrenagem

Nessa solução da transmissão diferencial temos uma cadeia cinemática paralela que possui três engrenagens cônicas. A entrada do movimento é dada por duas engrenagens de rotação independente e transmitida para a garra orientando a tocha. Dessa forma a tocha pode ser orientada com rotação em torno de dois eixos como mostra Figura 16. Quando ambas as engrenagens giram no mesmo sentido, elas produzem um movimento na vertical, ou “*pitch*”, ilustrado na Figura 16a. Quando as engrenagens giram em sentidos opostos, elas produzem um movimento em torno do eixo do braço, ou “*roll*”, como ilustra a Figura 16b.

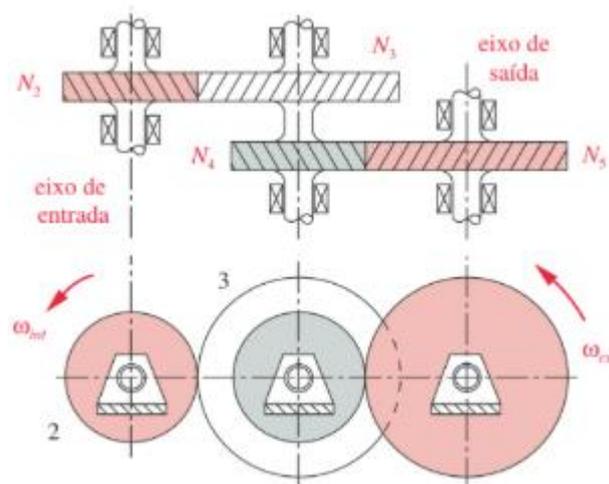
**Figura 16 - Transmissão diferencial (a) “pitch”, (b) “roll”**



Fonte: Pires (2014)

A transmissão de movimento com o trem de engrenagem, com razão de 36:1, é de arranjo série com quatro engrenagens, conforme a Figura 17. No eixo de entrada temos uma engrenagem, ligada ao motor, que transmite o movimento para o eixo central. No eixo central temos 2 engrenagens, a engrenagem com mais dentes recebe o movimento, e a com menos dentes transmite o movimento para o eixo final, onde estão as engrenagens cônicas da transmissão diferencial.

Figura 17 - Trem de engrenagens arranjo série

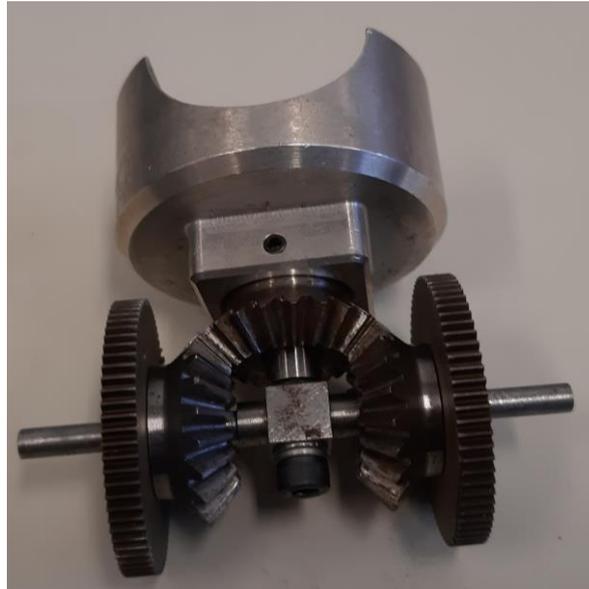


Fonte: Norton (2013)

### 3.3 Projeto preliminar e detalhado

Na fase do projeto preliminar segundo OGLIARI (2019), “[...] a solução conceitual é desenvolvida em termos do leiaute, arranjo, formas, geometria, materiais e processos de fabricação.” Ainda segundo OGLIARI (2019), o projeto detalhado “constitui-se na fase na qual os detalhes da solução otimizada são finalizados. [...] revisa-se a solução em detalhes, e prepara-se a documentação final do produto e de produção.”

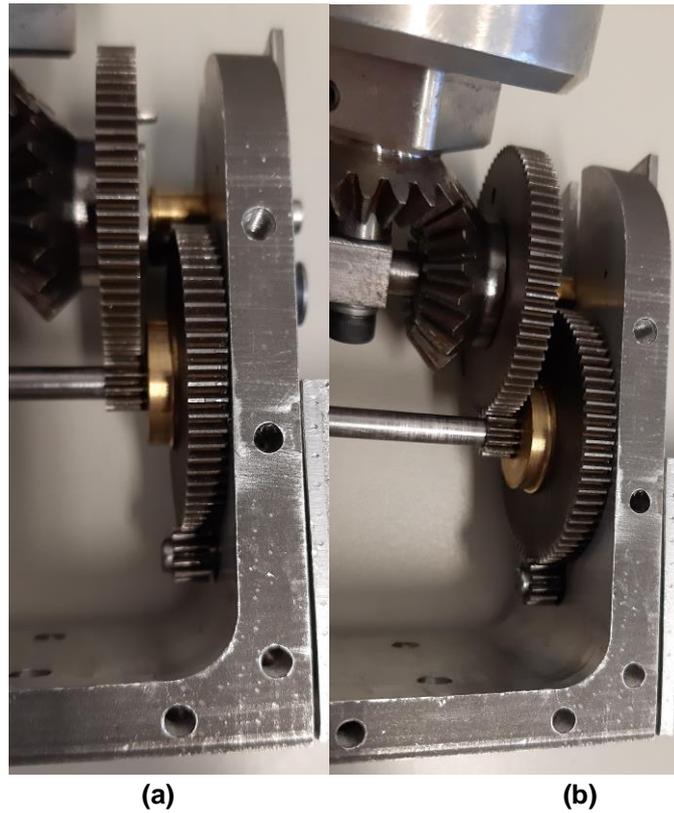
Por se encaixar nos requisitos do projeto e possuir uma mecânica de qualidade optou-se por utilizar o sistema de transmissão diferencial já existente do projeto de MEDEIROS et al (2017), Figura 18. Esse sistema possui 3 engrenagens cônicas de 20 dentes à 45°, que formam a transmissão diferencial. Possui também eixos de 5mm de diâmetro para cada engrenagem motora, apoiados em rolamentos 605ZZ. E também a garra que segura a tocha de soldagem.

**Figura 18 - Sistema de transmissão diferencial**

Fonte: Própria

Para a transmissão de movimento com trem de engrenagem de arranjo série de razão 36:1, Figura 19, foi escolhido aplicar 3 estágios com engrenagens de módulo 0,6 mm. O primeiro estágio com o eixo do próprio motor é fixada uma engrenagem de 12 dentes que propaga o movimento para outra de 72 dentes no segundo estágio, gerando um ganho de 6:1. O segundo estágio dispõe de um eixo fixo compartilhado entre os dois trens de engrenagem. Na engrenagem de 72 dentes do segundo estágio há, fixada a ela por meio de uma bucha, outra de 12 dentes. Ela por sua vez transmite o movimento para a engrenagem de 72 dentes do último estágio, fazendo outro ganho de 6:1, totalizando o ganho de 36:1.

**Figura 19 - Transmissão de movimento**



Fonte: Própria

As engrenagens da transmissão de movimento, Figura 20, foram fabricadas em aço inox 304 austenítico dada a resistência mecânica e à corrosão. Foi empregada o processo de eletroerosão a fio para realizar o corte dos dentes das engrenagens.

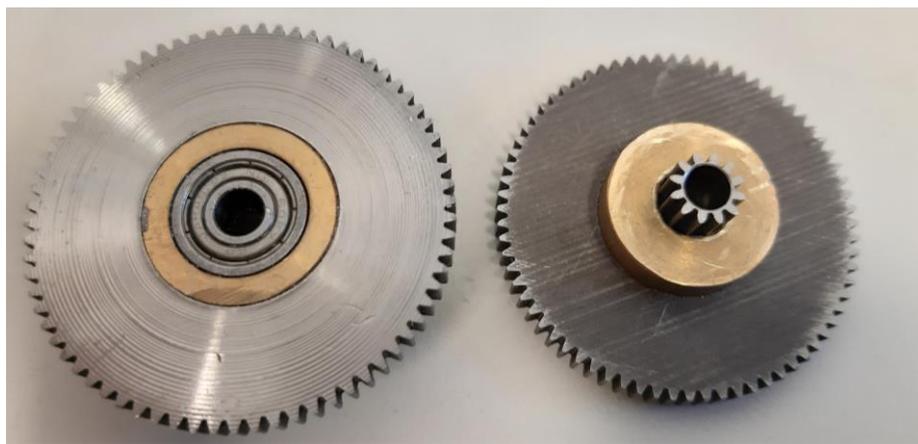
**Figura 20 - Engrenagens da transmissão de movimento**



Fonte: Própria

Para a fixação da engrenagem de 12 dentes na de 72 dentes do segundo estágio de transmissão foram aplicados também os processos de torneamento e prensagem. No torneamento foi aberto um furo nas engrenagens de 72 dentes onde foi embuchada uma peça de latão através da prensagem. Com a prensagem também foi fixada a engrenagem de 12 dentes na bucha. Para o material da bucha foi utilizado o latão por ser um material menos duro que o aço e de boa usinabilidade para facilitar a sua colocação por interferência. A Figura 21 apresenta o resultado dos processos.

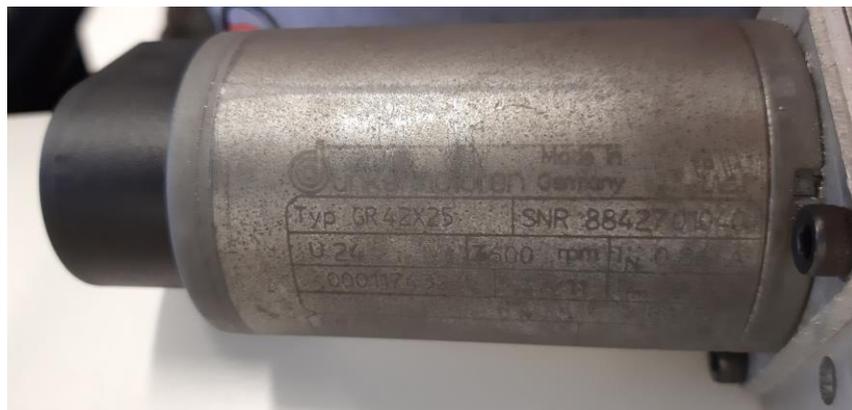
**Figura 21 - Engrenagens segundo estágio**



Fonte: Própria

O movimento da transmissão será dado por 2 servomotores CC (corrente contínua) com escovas, um para cada trem de engrenagens, ele é composto por um motor GR42x25 da “Dunkermotoren”, Figura 22, com torque nominal de 3,8 Ncm e velocidade nominal de 3600 rpm. Acoplado a ele está o encoder digital R30 de 500 linhas para fazer a realimentação de posição ao servo “driver”.

**Figura 22 - Motor CC GR42x25 com “encoder” R30**



Fonte: Própria

A base do punho, mostrada na Figura 23, foi projetada para comportar todos os engrenamentos do punho, tornar o punho um módulo único e facilitar a montagem e desmontagem do módulo. É possível, também, identificar na Figura 23, os parafusos M3 utilizados como fins de curso, que também são os “homes” do punho.

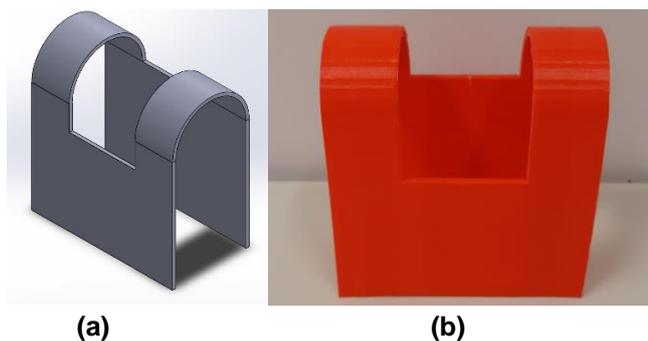
**Figura 23 - Base do punho**



Fonte: Própria

Para proteção dos engrenamentos do punho, contra respingos e salpicos durante o processo de soldagem, foi projetada uma chapa de alumínio de 1mm envolvendo a região aberta da base do punho, com um rasgo permitindo a movimentação da tocha, Figura 24a. A fim de comprovar o funcionamento da proteção foi impressa a chapa em uma impressora 3D, como mostra a Figura 24b.

**Figura 24 - Proteção do punho a direita projetada (a) e a esquerda impressa (b)**



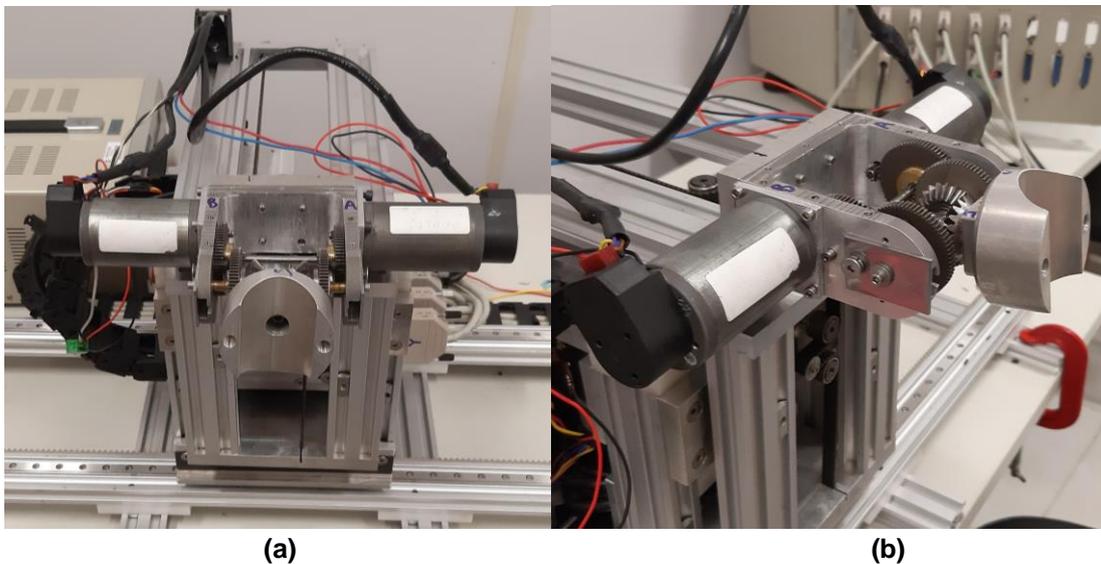
Fonte: Própria

#### 4. RESULTADOS

A avaliação experimental do punho foi realizada conforme as peças eram fabricadas. Avaliou-se concentricidade e alinhamento dos furos, as folgas e os travamentos nas engrenagens e nos engrenamentos. Após, então, procedeu-se para a montagem do punho onde verificou-se o funcionamento dos trens de engrenagem da transmissão de movimento e da transmissão diferencial.

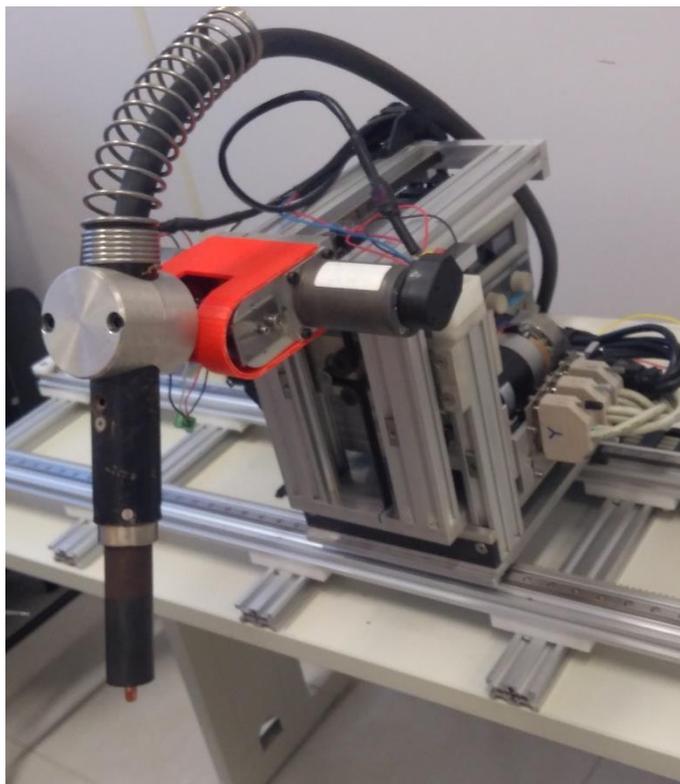
Concluída a montagem do punho, apresentado na Figura 25, prosseguiu-se para os testes. Então foram executados dois testes, necessários para avaliar o funcionamento do punho, sendo eles, os testes de parametrização e de operação de “*home*”. Iniciou-se pela parametrização dos motores do punho, eixos A e B do manipulador. A Figura 26 mostra o punho montado com a tocha de soldagem instalada.

Figura 25 - Punho montado vista frontal (a), vista lateral (b)



Fonte: Própria

**Figura 26 - Punho montado com tocha de soldagem instalada**



Fonte: Própria

Para todos os testes foi empregado o módulo eletrônico do manipulador, Figura 27.

**Figura 27 - Módulo Eletrônico**



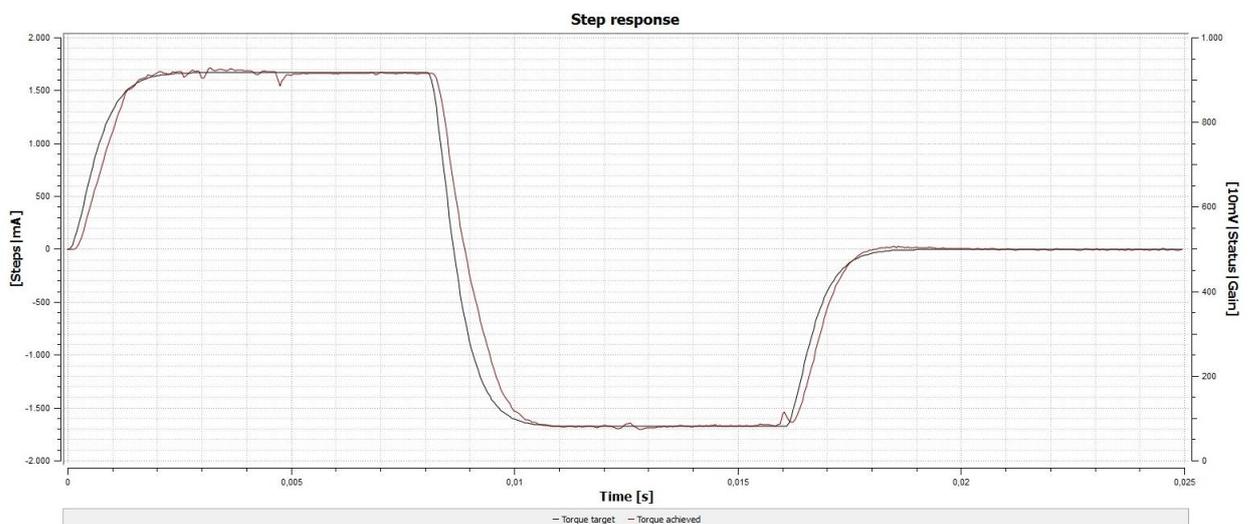
Fonte: Própria

#### 4.1 Parametrização

O processo da parametrização ocorreu em três partes, inicialmente fez-se os testes de controle do torque do motor, após foi informado ao “software” GDTtools os dados do motor e por fim realizou-se os testes de controle de posição. Para os testes de controle do torque e de controle de posição utilizou-se o mesmo método, foram avaliados gráficos da movimentação do motor e alterou-se os parâmetros de controle até obter-se uma curva próxima da ideal. A movimentação de teste foi feita na seguinte sequência, o motor parte da posição zero, realiza uma rotação no sentido positivo, então duas rotações no sentido negativo, passando pelo zero e indo até uma rotação negativa, e então faz uma última rotação positiva finalizando na posição zero.

Para o controle de torque fez-se uso de um controlador PI (proporcional integral), sendo a variável controlada a corrente do motor. A Figura 28 apresenta o gráfico de controle do torque do motor com os ganhos parametrizados de 3600 para o proporcional e 1000 para o integrador e o filtro passa baixa de 470 KHz.

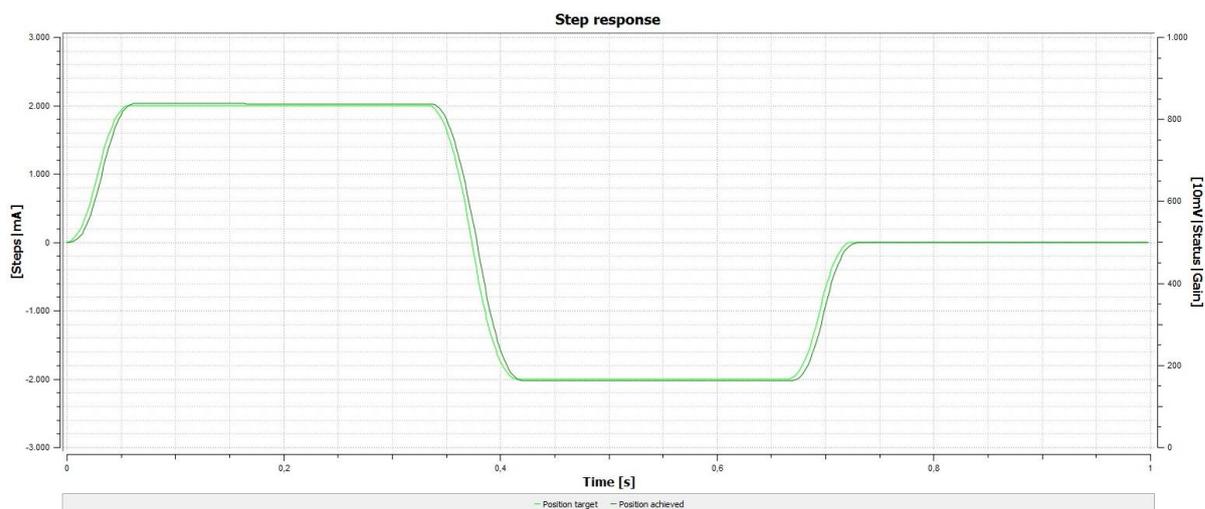
**Figura 28 - Gráfico de resposta do torque do motor**



Fonte: Própria

Para o controle de posição utilizou-se um PID (proporcional integral derivativo), sendo a variável de controle a quantidade de passos contados pelo encoder. Os parâmetros definidos dos ganhos foram 10 para o proporcional, 10 para o integrador e 20 para o derivativo, a Figura 29 apresenta o gráfico de controle de posição.

**Figura 29 - Gráfico de movimentação para parametrização**

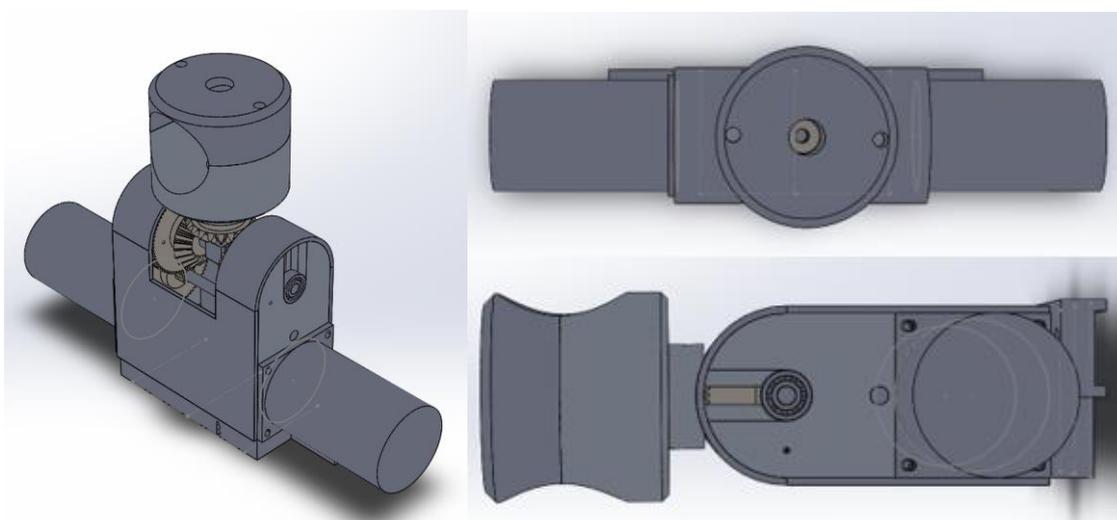


Fonte: Própria

#### 4.2 Teste de operação de “home”

A operação de “home” do punho é efetuada toda vez que o equipamento é ligado para garantir a posicionamento da tocha durante a operação de soldagem. O teste, por sua vez, é feito movimentando apenas uma das engrenagens motoras cônicas do diferencial até que ela chegue no fim de curso e então retorna trinta mil passos para a posição inicial de operação. Essa operação ocorre também na outra engrenagem motora do diferencial. Dessa forma o sistema embarcado encontra a posição da tocha independente de sua posição anterior a operação de “home”. A Figura 30 retrata a garra nas posições de “home”.

**Figura 30 - Posição inicial de operação nas vistas (a) isométrica, (b) frontal, (c) lateral**



(a)

Fonte: Própria

(b)(c)

A velocidade de operação do motor para o teste foi a nominal de 3600 rpm, tendo em vista que a razão da transmissão de movimento, 36:1, a velocidade de movimentação da garra é de 100 rpm ou 600°/s.

#### 4.3 Requisitos de projeto

Ao fim dos testes avaliou-se o punho com base nos requisitos de projeto, apresentados na Tabela 07.

**Tabela 07 - Requisitos de projeto x resultados alcançados**

<b>Especificações</b>	<b>Meta</b>	<b>Resultado alcançado</b>
Graus de liberdade	2 rotacionais	2 rotacionais
Resolução dos eixos rotativos	$\leq 0,05^\circ$	0,005°
Transmissão com folgas mecânicas minimizadas	Sim	Sim
Velocidade de orientação da tocha	$\geq 100$ rpm	100 rpm
Peso	$\leq 2$ kg	1,666 kg
Capacidade de Carga	$\leq 2$ kg	2 kg
Modular	Sim	Sim
Proteção dos engrenamentos	Sim	Sim

Com base na tabela é possível ver que as metas definidas foram alcançadas, os principais exemplos são a resolução dos eixos rotativos, o qual obteve-se um resolução de 0,005° dado que o servo “*drive*” manda dois mil pulsos e que há um ganho devido ao trem de engrenagens de 36:1, e a velocidade de orientação da tocha que em razão da velocidade nominal do motor, 3600 rpm, e o ganho do trem de engrenagens temos com o valor alcançado de 100 rpm.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A readequação do punho do manipulador cartesiano atendeu aos requisitos de projeto. Pode-se destacar que o conjunto de pequeno volume e peso, menor número de peças e a modularidade tornam o punho mais robusto para trabalho, transporte e utilização no ensino e pesquisa.

O modelo PRODIP foi uma ferramenta prática e eficiente para a interpretação das necessidades do usuário e definição dos requisitos de projeto. Facilitando também a concepção e comparação das possíveis soluções que culminaram na escolha do trem de engrenagens, para transmissão de movimento, e sistema diferencial, para a orientação da tocha.

Possíveis melhorias envolveriam a proteção dos engrenamentos que deve ser fabricada a chapa de proteção e colocada para que, então, possa ser aplicado o óleo nos engrenamentos e seja lacrado o punho. Além de criar uma solução para o fechamento do rasgo da chapa de proteção, fazendo o invólucro final do punho.



## REFERÊNCIAS

BACK, Nelson et al. **Projeto Integrado de Produtos**. Barueri, Sp: Editora Manole Ltda, 2008. 601 p.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley: Projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. Porto Alegre, Rs: Amgh Editora Ltda, 2011.

CARRARA, Valdemir. **Introdução a robótica industrial**. São José dos Campos: Inpe, 2015. 101 p.

CHOCHOLEK, SE. **The development of a differential for the improvement of traction control**. GLEASON CORPORATION, Rochester, NY. Disponível em: <<http://zhome.com/ZCMnL/tech/Torsen/Torsen.htm>>. Acesso: 26 de nov. de 2019.

CRAIG (1989) - CRAIG, J.J. **Introduction to Robotics**. Ed. Addison -Wesley Publishing, Inc., 1989.

ELDERFIELD & HALL. How to analyze a welding application for automation. **ELDERFIELD & HALL**, Knoxville, TN, 2015. Disponível em: <<https://www.profusiononline.com/welding/automation.htm>> Acesso: 28 jul. 2019

FERSILTEC. Retrofit em máquinas: calcule o retorno. **FERSILTEC**, Timbó, 27 jul. 2017. Disponível em: <<https://fersiltec.com.br/blog/servicos-para-industria/retrofit-de-maquinas-aumentar-a-produtividade-com-menor-investimento/>>. Acesso: 26 de nov. de 2019.

FLORES, Paulo; GOMES, José. **Cinemática e dinâmica de engrenagens: teoria e exercícios de aplicação**. Guimarães: Publindústria, 2015. 34 p.

GROOVER, Mikel P; et al. **Robótica Tecnologia e Programação**. São Paulo: McGraw-Hill, tradutor David Maurici Savatovsky, 1988.

HURBERT, Ivan Luiz. **Desenvolvimento mecânico de um manipulador para execução de procedimentos de soldagem a arco elétrico**. 2014. 40 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Departamento da Metal Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

MEDEIROS, Luan Florence de et al. Readequação tecnológica mecânica em manipulador de soldagem. **Sulpet: Responsabilidade Política e Unificação Nacional**, Florianópolis, v. 10, p.1-7, abr. 2017.

Miller Electric Mfg Co (2012). **Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW)**. Appleton, WI: Miller Electric Mfg Co.

NORTON, Robert L.. **Projeto de máquinas**. 4. ed. Porto Alegre, Rs: Bookman Editora Ltda., 2013.

PANSIERA, Paulo Eduardo. A ciência do retrofitting: Conceitos básicos. **Mecatrônica Atual**, Tatuapé, SP, v. 2, n. 5, p.41-43, fev. 2002.

PIRES, Rafael Pereira. **Planejamento e correção de trajetórias em manipulador de soldagem**. 2014. 56 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Departamento da Metal Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

RIBEIRO, Hélio O.. **Apostila de Soldagem**. Florianópolis, SC: Ifsc, 2001. 83 p.

The Lincoln Electric Company (2014). **Gas metal arc welding**, Product and procedure selection. Cleveland, OH. The Lincoln Electric Company.

VALE, Valentina Alessandra Carvalho do. **Controle de posição de um robô cartesiano por meio de técnicas adaptativas**. 2011. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2011.