

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

HENRIQUE GHIZONI

**DESENVOLVIMENTO DE MANIPULADOR ROBÓTICO DIDÁTICO
OPEN SOURCE FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA**

FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 2018.

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

HENRIQUE GHIZONI

**DESENVOLVIMENTO DE MANIPULADOR ROBÓTICO DIDÁTICO
OPEN SOURCE FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Mecatrônico.

Professor Orientador: Dr. Eng. Aurélio
da Costa Sabino Netto.

FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 2018.

Ghizoni, Henrique

DESENVOLVIMENTO DE MANIPULADOR ROBÓTICO DIDÁTICO OPEN SOURCE
FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA / Henrique Ghizoni: orientação de
Aurélio da Costa Sabino Netto.

- Florianópolis, SC, 2018.

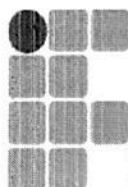
83 p.

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. Manipulador robótico didático. 2. Fabricação por filamento fundido. 3. Manufatura
aditiva.

I. Sabino Netto, A.C. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.



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(a) estudante **HENRIQUE GHIZONI**, matrícula nº **131004323-0**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **AVALIAÇÃO DE MANIPULADOR ROBÓTICO DIDÁTICO OPEN SOURCE FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 26 de julho de 2018.

Prof. Orientador do TCC: Aurélio Da Costa Sabino Netto

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, por viabilizar a realização dos todos os meus objetivos, com presença e amor incondicional.

Aos meus amigos Carlos, Larozan, Éliton, Gustavo e Victor, parceiros de jornada acadêmica e de inúmeras lembranças.

À Júlia, que sempre esteve do meu lado durante todo os tempos difíceis que passei.

Ao meu orientador Aurélio, que não mediu esforços para auxiliar e suprir as necessidades do projeto, com tempo e conhecimento.

"A diferença entre uma pessoa sã e um lunático é apenas um dia ruim."

Alan Moore.

RESUMO

Para a ampliação do uso de manipuladores robóticos, é necessário conhecimento aprofundado, sendo necessário capacitar os operadores e os tomadores de decisão para integrar com eficiência o robô na tarefa submetida e ao seu local de trabalho. Visando suprir esta demanda, o curso de Engenharia Mecatrônica do IFSC Campus Florianópolis oferece em sua ementa as disciplinas de Introdução à robótica, Robótica industrial e Projeto Integrador VI (no Módulo de Automação da Manufatura), que auxiliam no ensino de modelagem, simulação, operação e integração de robôs. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um manipulador robótico com o intuito de selecioná-lo e fabricá-lo utilizando manufatura aditiva por filamento polimérico fundido. Por meio da aplicação de *benchmarking*, tanto para manipuladores didáticos comerciais como para projetos abertos, encontrou-se os requisitos de projeto e com base nestes, foi escolhido o modelo mais apropriado. Após a seleção do manipulador, foram realizadas modificações do projeto, com intuito de adaptar e viabilizar a fabricação na instituição. Durante a fabricação do modelo, foram encontradas algumas dificuldades as quais foram relatados durante o desenvolvimento e sanadas conforme a demanda de garantia de funcionalidade do produto final. Como critério de avaliação, foram utilizados conjuntos de medições dimensionais como testes por apalpação de esfera rígida e digitalizações por *scanner laser*. Em resultados dos testes afora mencionados, pode-se concluir que as peças foram aprovadas em relação aos critérios estabelecidos, com desvio dimensional absoluto máximo de 1 mm. Por fim, valida-se o processo de fabricação por filamento fundido para construção de manipuladores robóticos com fins didáticos.

Palavras-chave: manipulador robótico didático, fabricação por filamento fundido, manufatura aditiva.

ABSTRACT

In order to increase the use of robotic manipulators, it is necessary to have in-depth knowledge, and it is necessary to train operators and decision makers to efficiently integrate the robot into the task submitted and to its workplace. In order to meet this demand, the course of Mechatronics Engineering of the IFSC Campus Florianópolis offers the subjects in Introduction to Robotics, Industrial Robotics and Integrated Project VI (during the Automation of Manufacturing Module), which assist in the teaching of modeling, simulating, operating and robot integration. The present work presents the evaluation of a robotic manipulator in order to select and manufacture it using additive manufacture by fused polymeric filament. Through the application of benchmarking, both on commercial didactic manipulators and on open source projects, the requirements were found and based on these, the most adequate one for the institution was chosen. After the selection of the manipulator, modifications of the project were made to adapt and make feasible the manufacturing in the institution. During the fabrication of the model, difficulties were encountered which were reported during development and were fixed according to the demand for functionality of the final product. As an evaluation criterion, sets of dimensional measurements were used, such as rigid sphere probing and laser scanning. In the results of the tests mentioned above, it can be concluded that the parts were approved in relation to the established criteria, with a maximum absolute dimensional deviation of 1 mm. Finally, fused filament fabrication is validated for the construction of robotic manipulators for didactic purposes.

Keywords: didactic robot manipulator, fused filament fabrication, additive manufacturing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Robô Manipulador ABB IRB 140.....	24
Figura 2 - Robô Cartesiano	25
Figura 3 - Robô Cilíndrico	26
Figura 4 - Robô esférico	27
Figura 5 - Robô SCARA	27
Figura 6 - Robô Antropomórfico	28
Figura 7 - Sistema de Coordenadas.....	28
Figura 8 - Esquema de um manipulador 3DOF.....	29
Figura 9 - Parâmetros Denavit-Hartenberg	30
Figura 10 - Modelo RobotAnalyzer.....	31
Figura 11 - Funcionamento Extrusor	32
Figura 12 - Superfície de Impressão	33
Figura 13–Fatiamento de geometria	34
Figura 14 - Exemplo de modelo tridimensional	34
Figura 15 - Exemplo de modelos com suporte	35
Figura 16 - Fenômeno de empenamento	36
Figura 17 - Fluxograma de trabalho	37
Figura 18 - Manipulador AL5D-PLTW	43
Figura 19 - Interface do software FLOWARM	43
Figura 20 - Manipulador Sunfounder	44
Figura 21 - Manipulador DOBOT MAGICIAN	45
Figura 22 - Manipulador hRobot.....	46
Figura 23 - Manipulador Thor	47
Figura 24 - Rolamento <i>OpenSource</i>	48
Figura 25 - Rolamento adaptado ao eixo	48
Figura 26 - Manipulador Moveo.....	49
Figura 27 - Manipulador MOVEO original	51
Figura 28 - Vista explodida MOVEO	52
Figura 29 - Ajuste de montagem porca	53
Figura 30 - União por porcas da junta 5	53
Figura 31 - Inserto Roscado e aplicação	54

Figura 32 - Alteração peça 4M1D motor de passo	55
Figura 33 - Junta 1 rotativa e modelo de tensionador	56
Figura 34 - ROSTOCKMAX V2.....	57
Figura 35 - Peça 2M1D, dimensões máximas	58
Figura 36 - Cubo de calibração.....	60
Figura 37 - Modelo de orientação de fabricação.....	60
Figura 38 - Estruturas de suporte peça 4M2.....	61
Figura 39 - Alterações Realizadas 4M1D	61
Figura 40 - Exemplo montagem prévia.....	63
Figura 41 - Montagem Manipulador.....	64
Figura 42 - Peça com empenamento.....	65
Figura 43 - Alojamento da Correia.....	65
Figura 44 - Adaptação correia	66
Figura 45 - Engrenamento da correia	66
Figura 46 - Braço absoluto ROMER	67
Figura 47 - Digitalização 42MCB	69
Figura 48 - 3M2CC	69
Figura 49 - 1M1B	70
Figura 50 - Exemplo de montagem junta	71
Figura 51 - Digitalização Planicidade Junta 5.....	71
Figura 52 - Digitalização Planicidade Junta 4.....	72
Figura 53 - Digitalização Planicidade Junta 2.....	72
Figura 54 - Cadeia cinemática	73
Figura 55 - Disposição das juntas.....	74
Figura 56 - Alcances manipulador	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Recursos manipuladores comerciais.....	45
Tabela 2 - Recursos manipuladores <i>open source</i>	50
Tabela 3 - Parâmetros de comparação motores Nema 14 e Nema 17	55
Tabela 4 - Recursos ROSTOCK V2	58
Tabela 5 - Parâmetros de Impressão	59
Tabela 6 - Dimensões nominais das polias.....	68
Tabela 7 - Resultados tamanhos elos	73
Tabela 8 - Alcances das juntas	74
Tabela 9 - Alcances cartesianos	75

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivos Gerais	21
1.2.2	Objetivos Específicos	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	ROBÓTICA.....	23
2.1.1	Definição de Robô	23
2.1.2	Cinemática.....	28
2.1.3	DENAVIT-HARTENBERG	29
2.2	IMPRESSÃO 3D.....	31
2.2.1	Fabricação por filamento fundido (FFF).....	32
2.2.2	Modelos 3D e planejamento de trajetórias	33
2.2.3	Características do Processo	35
3	METODOLOGIA	37
4	<i>Benchmarking</i> de manipuladores.....	41
4.1	Projetos de manipuladores didáticos.....	41
4.1.1	Produtos comerciais	42
4.1.2	Avaliação manipuladores comerciais.....	45
4.1.3	Projetos <i>open source</i>	46
4.2	Seleção do manipulador	49
5	Melhorias e Alterações.....	51
5.1	Projeto original MOVEO	51
5.2	Fixações na montagem	52
5.3	Adaptações comerciais	54
6	Planejamento do Processo	57
6.1	Características da impressora 3D disponível	57

6.2	Tamanho das peças	58
6.3	Parâmetros de impressão e <i>Setup</i>	59
6.4	Suportes.....	60
7	Fabricação dos componentes por impressão 3D	63
8	Avaliação do manipulador	67
8.1	Avaliação por medição por coordenadas	67
8.2	Resultados Metrológicos.....	68
8.3	Digitalizações.....	68
8.3.1	Dimensão dos elos.....	73
8.3.2	Alcances	74
9	Conclusões.....	78
9.1	Sugestões para trabalhos futuros	79
	Referências.....	80

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade o ser humano vem desenvolvendo ferramentas para a sua sobrevivência ou para tornar sua vida mais confortável. Conforme a sociedade evolui, a demanda por produtos diferentes e em grandes quantidades também começa a motivar o desenvolvimento por tecnologias novas e a criação de indústrias. Do crescimento das indústrias e de suas aplicações, a automação ganha espaço. Surge a tendência de cada vez mais substituir o operador humano por máquinas que possam realizar um mesmo trabalho. Uma resposta é a robótica, que se difunde na manipulação de objetos com pesos ou dimensões elevadas ou implementados em ambientes de trabalhos insalubres para o homem, como a solda ou atividades de risco como manipulação de explosivos.

Para a ampliação do uso de manipuladores robóticos, vários conhecimentos são necessários para capacitar os operadores e os tomadores de decisão para integrar com eficiência o robô na tarefa submetida e ao seu local de trabalho. Tendo em vista esta necessidade, o curso de engenharia mecatrônica oferece aos seus discentes, disciplinas como Robótica Industrial e Projeto Integrador VI, que trabalham na operação, simulação e integração de robôs (PROJETO PEDAGÓGICO DO CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA, 2018).

No contexto atual da engenharia, a manufatura aditiva vem se difundindo. Os principais processos, desenvolvidos e patenteados no fim da década de 80, são baseados na adição de material, em camadas planas que ao fim de sucessivas deposições dão forma a geometria final do componente. O grande diferencial destes processos de adição em relação a outros de fabricação, é a facilidade de uso e sua automatização, dispensando moldes, ferramentas especiais e minimizando consideravelmente a intervenção do operador durante o processo, utilizando as informações geométricas da peça a ser fabricada diretamente do sistema CAD (Computer Aided Design) para o planejamento do processo, que ocorre de forma bastante automatizada (VOLPATO, 2007).

O IFSC da unidade Florianópolis dispõe de um grupo de pesquisa especializado no estudo de manufatura aditiva, entre eles, o processo FFF. O grupo de pesquisa PFBMAT possui impressoras de filamento de software e hardware aberto, algumas sendo produzidas na própria instituição ou adquiridas

comercialmente. Então, pelo IFSC possuir estrutura adequada e conhecimento técnico na área, o processo de fabricação selecionado para a materialização do manipulador robótico foi o FFF.

A ideia de fabricar manipuladores robóticos com impressão 3D começa a ganhar espaço, principalmente pelo barateamento dos materiais envolvidos, dos componentes eletrônicos e pela facilidade do acesso à informação, onde aparecem cada vez mais projetos de código aberto e plataformas que fornecem o necessário para a execução dos mesmos.

1.1 Justificativa

Dados da *Robotic Industries Association* (RIA) apontam novos recordes nas áreas de compra, revenda e envio de unidades robóticas no mercado americano no ano de 2017. No total foram vinculadas 19.331 unidades avaliadas em aproximadamente \$1.031 bilhões de dólares, no primeiro semestre do ano. Estes valores são 33% maiores se comparados ao ano de 2016, mostrando a crescente no segmento (*Robotics Industries Association*, 2017).

A ampliação da robótica pelas indústrias passa pela difusão dos conhecimentos específicos nos quais fatores de dimensionamento e aplicação de robôs industriais garantem a melhor utilização dos recursos. Com o intuito de suprir esta demanda, o curso de Engenharia Mecatrônica do IFSC - Campus Florianópolis oferta duas disciplinas inerentes a estes conhecimentos, sendo: Introdução à robótica e Robótica industrial, que oferecem as competências em modelagem de robôs, principais elementos, planejamento de trajetórias, simulação, classificação de robôs, entre outras. A disciplina de Projeto Integrador IV também aplica robótica em suas competências, sendo uma delas a integração de robôs com máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) em células flexíveis de manufatura (PROJETO PEDAGÓGICO DO CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA, 2018).

Atualmente o campus dispõe de duas unidades de manipulação robótica, um modelo ABB IRB 140 para uso geral de manipulação e um manipulador FANUC 20i adaptado à soldagem automatizada. Para atender melhor a comunidade acadêmica do curso, observa-se a necessidade de mais unidades robóticas, e desta demanda inicia-se o trabalho de encontrar formas alternativas de materializar

manipuladores robóticos, que não precisam possuir integralmente todos os recursos disponíveis em unidades comerciais citadas anteriormente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver um manipulador robótico pelo processo de manufatura rápida FFF para a utilização didática em aulas do curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis. O propósito do robô é o aprendizado nas áreas de programação, controle, modelagem e integração com a manufatura.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar informações sobre robôs manipuladores e projetos didáticos
- Descrever e implementar o processo de fabricação envolvido
- Levantar restrições mecânicas e especificações do manipulador
- Projetar o sistema eletrônico e programação
- Realizar e documentar eventuais alterações de projeto
- Avaliar o produto final

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ROBÓTICA

O ser humano, desde a antiguidade, procura a utilização de ferramentas e utensílios para o auxiliar em suas tarefas cotidianas e em sua sobrevivência. Esta busca por novas tecnologias e o grau de desenvolvimento é tida pela civilização ocidental como o nível de evolução humana. Esta busca por realizar tarefas de forma efetiva pode-se dizer então, que é a motivação para a criação de máquinas e ferramentas (ROMANO, 2002).

Com o advento da máquina a vapor, inicia-se a primeira revolução industrial, onde os processos produtivos conseguem entregar quantidades massivas de produtos, abrindo espaço para a substituição da mão de obra humana por máquinas. Este conceito de indústria foi aplicado por Henry Ford, no início do século XX, onde o uso de equipamentos especializados para a fabricação de produtos em larga escala com características similares eleva a importância da indústria para a sociedade (ROMANO, 2002).

Considerada uma disciplina acadêmica jovem, a robótica tem ambiciosos objetivos, sendo o último a criação de máquinas que podem se comportar e pensar como humanos. Esta tentativa de criar máquinas inteligentes naturalmente nos leva primeiro a nos examinar, buscando entender como nossos corpos e membros são coordenados e como aprendemos a realizar tarefas complexas. Entende-se finalmente que as questões fundamentais da robótica acabam sendo questões sobre nós mesmos (LYNCH, 2017)

2.1.1 Definição de Robô

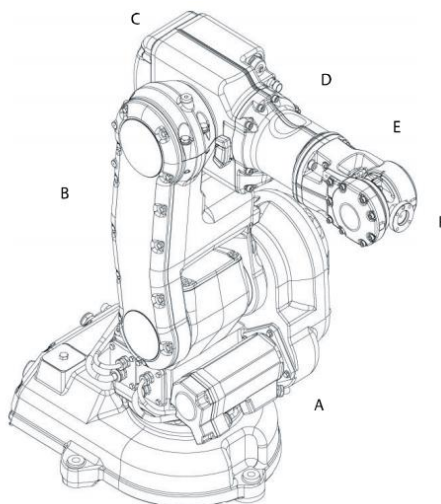
De acordo com Romano, (2002, p.15), robôs são definidos como manipuladores reprogramáveis, projetados para movimentar materiais ou ferramentas automaticamente, por diversos movimentos programados para o desempenho de uma variedade de tarefas.

A estrutura mecânica de um robô manipulador Figura 1 basicamente é composta por uma sequência de corpos rígidos denominados elos, interconectados com articulações representadas pelas letras A a F, denominadas juntas. Os elos apresentam propriedades inerente aos materiais, portanto, deve-se ater aos

esforços de flexão e torção a eles submetidos, tanto esforços estáticos como dinâmicos a fim de obter no fim efetiva rigidez (SICILIANO, 2009).

Os materiais mais comuns na estrutura de elos são aço, alumínio e ligas metálicas. Alguns modelos mais recentes trazem como opção termoplásticos ou fibra de carbono.

Figura 1 - Robô Manipulador ABB IRB 140



Fonte: Adaptado de (ABB, 2017)

Segundo Siciliano, (2009, p. 4), juntas são responsáveis pela composição dos pares cinemáticos e consequentemente pela mobilidade do manipulador. Esta união entre dois elos adjacentes, em geral são compostos por juntas ou rotacionais ou prismáticas, o que aderem graus de liberdade ao sistema mecânico. Juntas prismáticas permitem o movimento relativo translacional entre os elos que a compõe, enquanto uma articulação rotacional permite o movimento relativo de rotação entre elos.

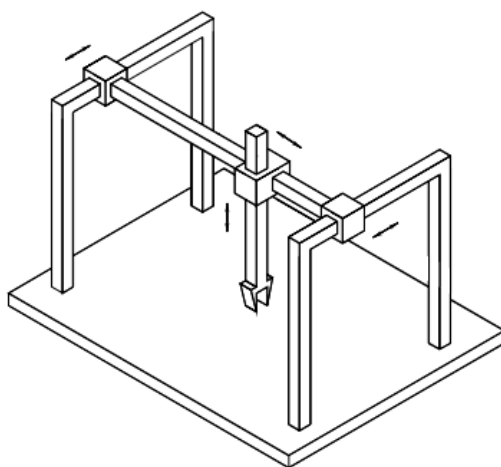
Graus de liberdade é a propriedade de movimentação e orientação de um corpo rígido pelo espaço. Em casos gerais, para um posicionamento arbitrário e orientação de um objeto no espaço tridimensional, são necessários seis DOF (*Degrees of Freedom*) sendo três responsáveis para posicionar um ponto e três para orientar o objeto em relação a um eixo de referência. Em robótica, os graus de liberdade estão atrelados aos números de variáveis necessárias para a determinar a localização e orientação do efetuador final do mecanismo (ROMANO, 2002).

Segundo Romano (2002) e Siciliano (2009), o volume de trabalho de um robô representa a parte do ambiente a qual o efetuator final consegue acessar. Sua forma e volume dependem da estrutura do manipulador, bem como a presença de limitadores nas suas articulações mecânicas. A tarefa requerida ao braço é o posicionamento do punho, que é responsável pela orientação do atuador final.

Utilizando a bibliografia de Siciliano (2009), o autor aponta configurações recorrentes de manipuladores, em função dos tipos de juntas.

O robô cartesiano Figura 2 tem como geometria três juntas prismáticas, cujos eixos tipicamente são ortogonais entre si. Pelo tipo de junta utilizada, resulta em uma geometria mais simples, sendo cada DOF corresponde a uma variável de posicionamento no espaço, com isso, é natural a realização de movimentos diretos. A estrutura cartesiana oferece muito boa rigidez mecânica, sendo muito utilizada em máquinas ferramentas que demandam esforços de usinagem. Por sua configuração, a precisão de posição do punho é constante em todos os pontos do volume de trabalho. O volume de um manipulador cartesiano é limitado a um prisma retangular. A vantagem da utilização de um robô cartesiano é a ampla utilização de um espaço de trabalho, permitindo o manuseio de objetos com grandes dimensões e pela robustez de sua estrutura, componentes com considerável peso, porém, sua principal desvantagem é a impossibilidade de orientações diferentes da ferramenta. Os atuadores nas juntas mais comuns nestes tipos de robôs são tipicamente elétricos e ocasionalmente pneumáticos (SICILIANO, 2009).

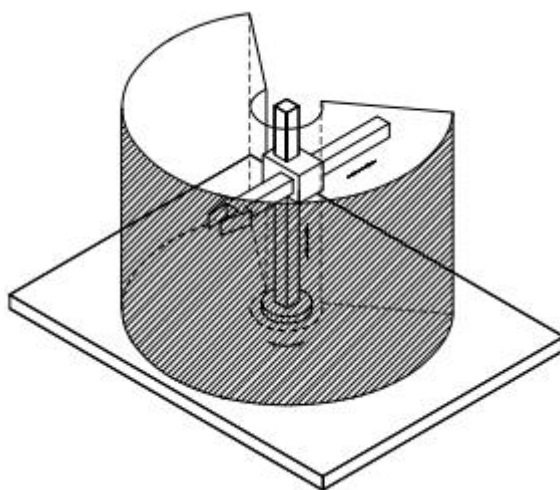
Figura 2 - Robô Cartesiano



Fonte: Adaptado de (SICILIANO, 2009)

O robô do tipo cilíndrico Figura 3 difere do cartesiano pela primeira articulação da base prismática ser substituída por uma junta de revolução. Se descrito em coordenadas cilíndricas, cada DOF também corresponde a uma variável, onde com o valor de altura e o ângulo da junta rotativa se obtêm a posição do efetuador. O volume de trabalho do robô é descrito por uma porção de um cilindro oco. Os manipuladores cilíndricos são empregados principalmente para o transporte de objetos de largas dimensões, e geralmente possuem atuadores elétricos ou hidráulicos.

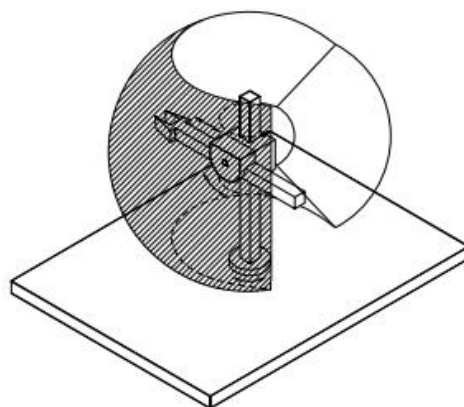
Figura 3 - Robô Cilíndrico



Fonte: Adaptado de (SICILIANO, 2009)

A configuração de geometria esférica Figura 4 difere da cilíndrica na medida em que a segunda junta prismática é substituída por uma junta de revolução. Se descrito em coordenadas esféricas, cada DOF também corresponde a uma variável espacial. A rigidez mecânica é menor que as geometrias cartesiana e cilíndrica, e sua construção é mais complexa. A precisão do posicionamento do pulso diminui à medida que a distância radial aumenta. A distribuição do volume de trabalho é uma porção de uma esfera oca e para obtenção das variáveis que influenciam no seu posicionamento, utiliza coordenadas esféricas.

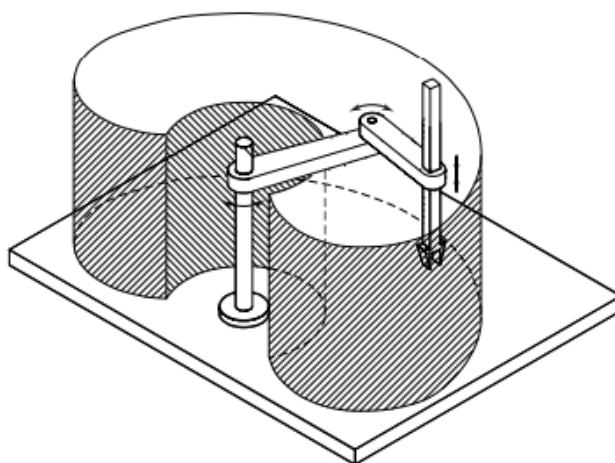
Figura 4 - Robô esférico



Fonte: Adaptado de (SICILIANO, 2009)

Uma geometria que tem destaque é os manipuladores SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot*) que dispõe de duas juntas rotativas e uma prismática, de tal forma que todos os eixos são paralelos. Ele é caracterizado por sua mecânica estrutural que oferece alta rigidez em cargas verticais. A estrutura SCARA Figura 5 é amplamente utilizada na manipulação de pequenos objetos com considerável velocidade.

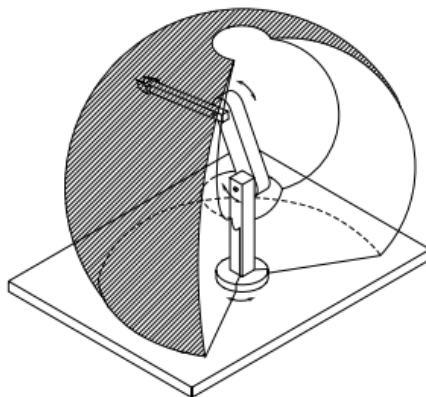
Figura 5 - Robô SCARA



Fonte: Adaptado de (SICILIANO, 2009)

A geometria antropomórfica é composta por três juntas rotativas, sendo o eixo rotacional da primeira junta ortogonal aos outros dois, que são paralelos entre si. É denominado antropomórfico pela sua semelhança com o braço humano, em virtude disto, a segunda junta articulada é denominada ombro e a terceira, cotovelo. Os robôs antropomórficos Figura 6 são os que mais possuem destreza, já que possuem todas as articulações rotacionais e com isso, atingem orientações diversas.

Figura 6 - Robô Antropomórfico



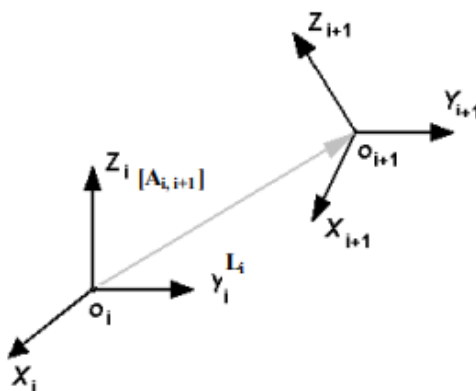
Fonte: Adaptado de (SICILIANO, 2009)

2.1.2 Cinemática

Um manipulador robótico pode ser representado esquematicamente de um ponto de vista mecânico como uma cadeia cinemática de corpos rígidos (elos) conectados por juntas. A extremidade fixa da cadeia é denominada base enquanto o efetuador final é localizado na outra extremidade. O movimento resultante da estrutura é obtido pela composição dos movimentos elementares de cada elo em relação ao anterior, sendo assim, para manipular um objeto no espaço, é necessário conhecer a posição e orientação do efetuador final.

Um corpo rígido pode ser completamente descrito no espaço por sua posição e orientação em relação a um sistema de coordenadas de referência (Figura 7).

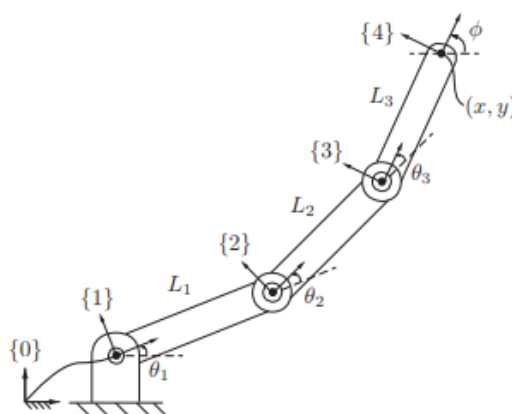
Figura 7 - Sistema de Coordenadas



Fonte: Adaptado de (SICILIANO, 2009)

De acordo com LYNCH, 2017, com base na cadeia cinemática relacionada à estrutura do manipulador, é possível realizar operações algébricas com base em transformações homogêneas de rotação e translação resultando na cinemática direta do manipulador, que é a relação entre os ângulos das juntas com algum eixo cartesiano (Figura 8).

Figura 8 - Esquema de um manipulador 3DOF



Fonte: Adaptado de: (LYNCH, 2017)

2.1.3 DENAVIT-HARTENBERG

Uma metodologia muito difundida para encontrar a equação de cinemática direta de manipuladores de cadeia aberta é uso do algoritmo de Denavit-Hartenberg (DH), que representam parâmetros de um elo.

Em geral, um robô 3D é composto de n juntas e $n + 1$ elos. Numerando, os elos iniciam com valor 0 para o elo fixo da base e n para o elo do efetuador final. As juntas iniciam com valor 1, conectando o primeiro elo móvel até o elo da base aumentando sequencialmente até o valor n . Portanto, o elo i é conectado entre o elo inferior $i - 1$ pela junta i e conectado com o elo posterior $i + 1$ pela junta $i + 1$ (PREEZ, 2014).

O algoritmo orienta o sentido dos eixos, e com base nestes, retira valores de distâncias e ângulos fixos ou variáveis. Para um sistema de coordenadas F_i , o método é descrito da seguinte maneira:

1. O eixo z_i é alinhado com o eixo da junta $i + 1$
2. O eixo x_i é definido pela normal comum entre o eixo z_{i-1} e o eixo z_i , apontando de z_{i-1} para z_i

3.O eixo y_i é obtido resultante pela regra da mão direita

No método DH, a origem o_i e um sistema de coordenadas $Fi(o_i, x_i, y_i, z_i)$ conectado a um elo i é posicionado na intersecção do eixo da junta $i + 1$, com a normal comum entre os eixos z_{i-1} e z_i .

Os quatro parâmetros $(a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i)$ são ditos parâmetros de Denavit Hartenberg, utilizados para definir a geometria de um elo i :

- 1.Comprimento do elo a_i é a distância ao longo do eixo x_i entre os eixos z_{i-1} e z_i .
- 2.Torção do elo α_i é o ângulo de rotação em x_i entre os eixos z_{i-1} e z_i .
- 3.Distância de junta d_i é a distância ao longo de z_{i-1} entre os eixos x_{i-1} e x_i
- 4.Ângulo de junta θ_i é o ângulo de rotação no eixo z_{i-1} entre os eixos x_{i-1} e x_i

A aplicação destes parâmetros resulta em uma matriz, exemplificada na Figura 9 (PREEZ, 2014).

Figura 9 - Parâmetros Denavit-Hartenberg

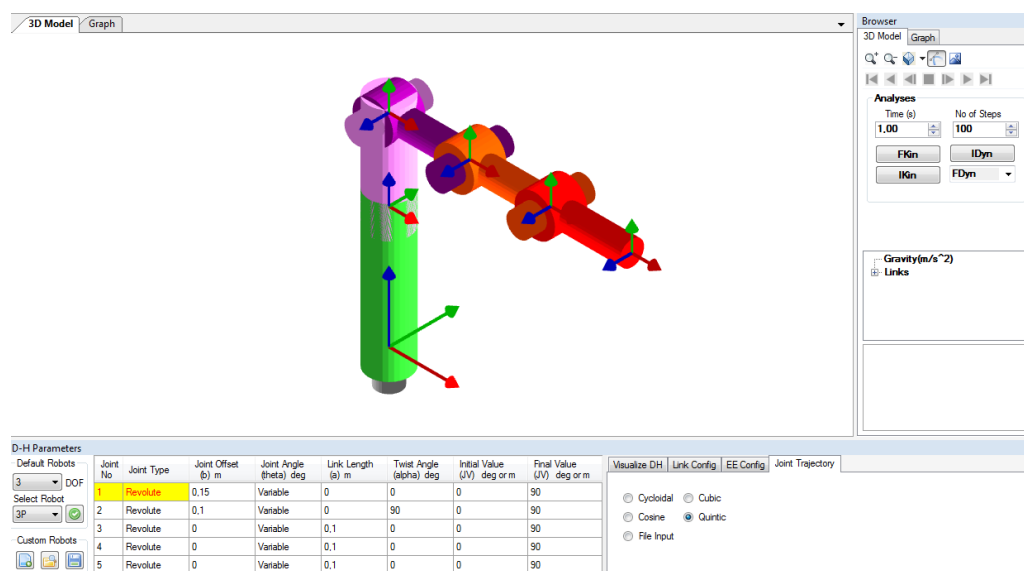
Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	α_1	d_1	θ_1
2	a_2	α_2	d_2	θ_2
...	...	...	...	...
j	a_j	α_j	d_j	θ_j
...	...	...	...	...
n	a_n	α_n	d_n	θ_n

Fonte: Adaptado de (PREEZ, 2014)

O método auxilia na descrição da cadeia cinemática de qualquer manipulador robótico de cadeia aberta. Existem diversos programas que utilizam os parâmetros DH como base do modelo matemático de manipuladores, e com ele, resolver sua cinemática direta e inversa. Em resumo, a cinemática direta e inversa relaciona os ângulos das juntas com a posição e orientação em XYZ do efetuador final da cadeia.

A Figura 10 mostra uma imagem do software *RobotAnalyzer*, que para modelar e simular cadeias cinemáticas recebe apenas como entrada os parâmetros de Denavit-Hartenberg.

Figura 10 - Modelo RobotAnalyzer.



Fonte: Próprio Autor

2.2 IMPRESSÃO 3D

A manufatura aditiva ou popularmente conhecida por impressão 3D pode ser definida como um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas, isto é, baseado no princípio da manufatura por camada. Esta tecnologia permite fabricar componentes (protótipos, modelos, etc.) físicos em três dimensões (3D), com informações obtidas diretamente do modelo geométrico gerado no sistema CAD, de forma rápida, automatizada e totalmente flexível (VOLPATO, 2007).

Há alguns anos, as impressoras 3D custavam dezenas de milhares de dólares e eram apenas utilizadas por profissionais. Desde o término das principais patentes e, conseqüentemente, por conta de projetos *opensource*, começando com a impressora *RepRap* e posteriormente com a popular *Makerbot*, a impressão 3D caiu de preço abaixo dos mil dólares, aparecendo em escolas, casas e inúmeras oficinas. As principais impressoras por volta deste preço criam objetos com camadas

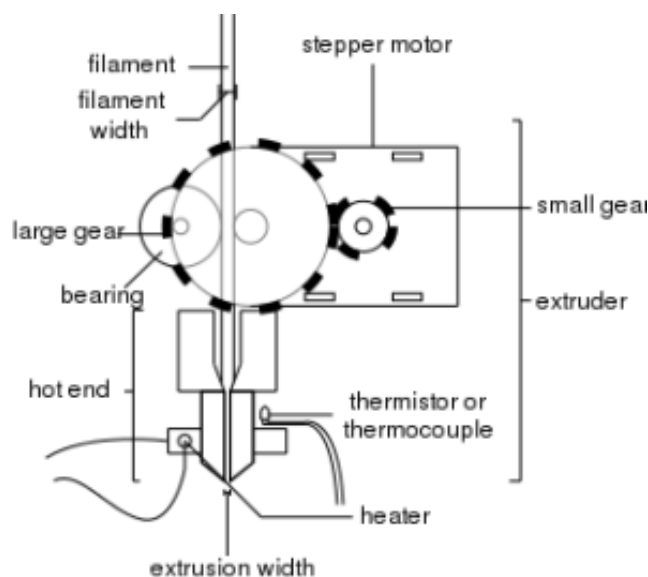
de plástico ABS ou PLA (os materiais mais comuns), que são alimentados em carretéis das mais variadas cores (ANDERSON, 2012).

2.2.1 Fabricação por filamento fundido (FFF)

O processo de fabricação por filamento fundido consiste na obtenção de uma geometria após sucessivas deposições de camadas de material, comumente polímeros. A ferramenta responsável pela deposição do filamento denomina-se extrusor e as trajetórias que esta percorre resultando na geometria da peça, são geradas a partir do arquivo CAD do objeto qual quer se fabricar.

O extrusor funciona tracionando o filamento entre componentes rolantes, empurrando-o contra o bico de extrusão que aquece o material com temperatura controlada (Figura 11), formando um fluxo contínuo de fundido que adere nas camadas anteriores. Com o resultado de sucessivas camadas, é obtida a forma final do objeto desejado. Este processo de deposição de material fundido em camadas foi patenteado pela empresa *Stratasys* na década de 90 e com a expiração da principal em 2009, o método se popularizou (VOLPATO, 2007).

Figura 11 - Funcionamento Extrusor

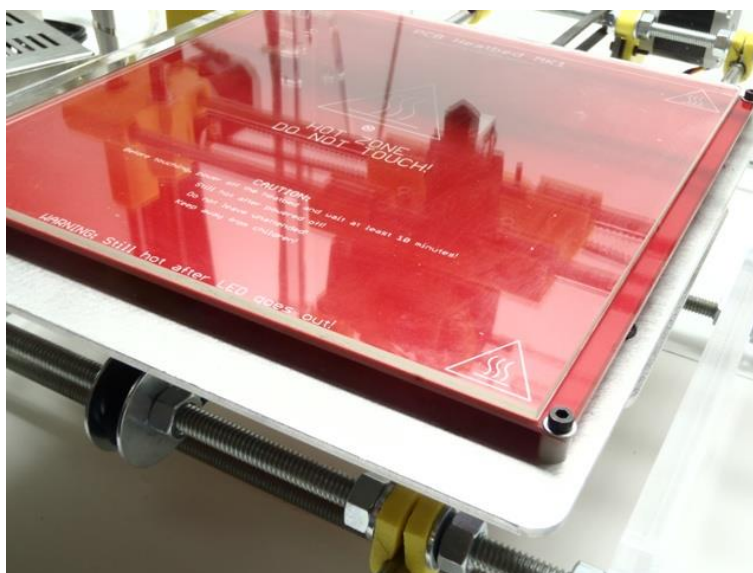


Fonte: Adaptado de (JOSHC, 2018)

Outro elemento do processo FFF de materiais poliméricos é a presença na máquina de uma superfície aquecida, modelo demonstrado na Figura 12, para a

deposição do material fundido. Este componente é auxilia a adesão da primeira camada de impressão e garante o posicionamento relativo entre o material já solidificado e aos movimentos seguintes do bico extrusor.

Figura 12 - Superfície de Impressão

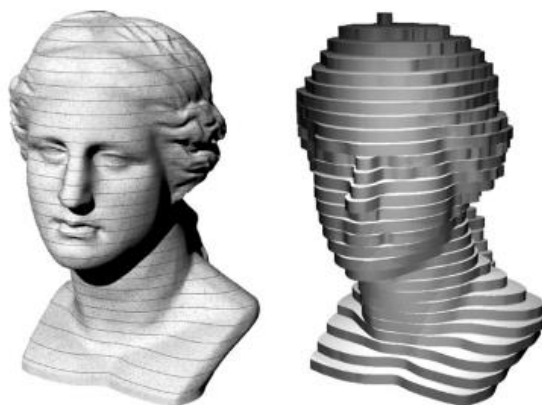


Fonte: Adaptado de (AIRWOLF 3D, 2013)

2.2.2 Modelos 3D e planejamento de trajetórias

Para a programação das trajetórias que as máquinas impressoras realizam, é necessária a utilização de *softwares* ditos fatiadores, que recebem os arquivos CAD e com base nas geometria dos mesmos, programam os percursos que o extrusor realiza, podendo variar os tipos de preenchimento e densidades das peças produzidas (Figura 13). Muitos destes programas são de código aberto, fator que influenciou muito a propagação do processo de fabricação e do aperfeiçoamento dos mesmos, que recebem constantes atualizações de recursos e funcionalidades, exemplo *MatterControl*, *Craftware*, entre outros.

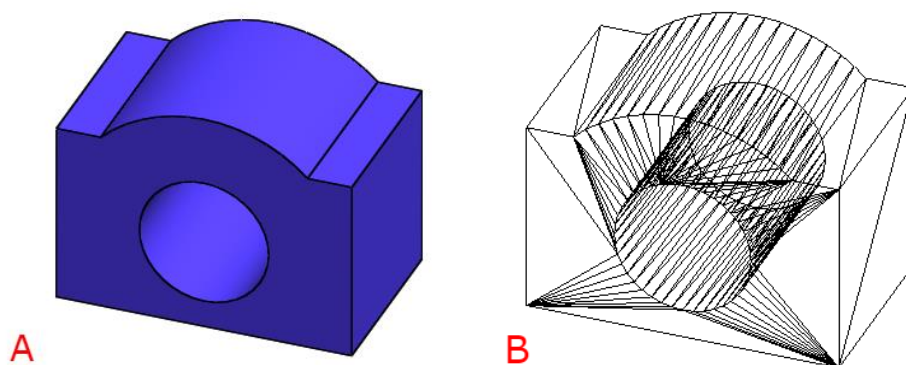
Figura 13–Fatiamento de geometria



Fonte: Adaptado de: (GEBHARDT, 2016)

O principal formato de arquivo utilizado e padronizado é o denominado STL (*Standard Tessellation Language*), que transforma uma superfície sólida ou superfície gerada por programas CAD em uma malha triangularizada com graus de resolução de conversão baseados nos tamanhos dos triângulos gerados, exemplificados pela Figura 14(A), modelo em CAD e pela Figura 14(B), modelo em STL. Os arquivos STL contém as coordenadas dos três vértices de cada triângulo da malha e os vetores normais à superfície resultando em atribuição de volume. Tendo em vista que a superfície é baseada em elementos triangulares, matematicamente se torna possível fatiar o modelo em qualquer coordenada Z desejada (GEBHARDT, 2016).

Figura 14 - Exemplo de modelo tridimensional



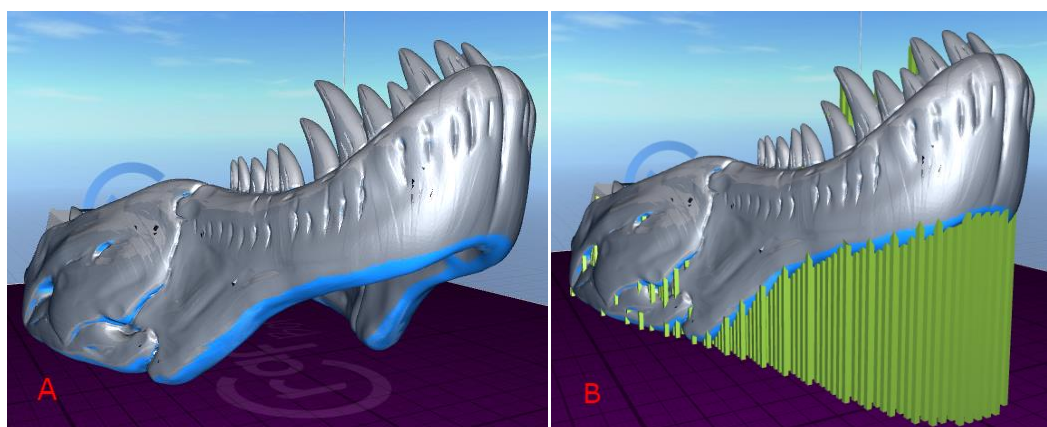
Fonte: Próprio Autor

2.2.3 Características do Processo

Ao planejar a fabricação de um componente, deve-se levar em consideração alguns fatores importantes de geometria, como sua orientação em relação ao plano de impressão e a presença de superfícies suspensas na peça.

Uma das soluções mais difundidas a obtenção de uma peça impressa de qualidade, é a utilização de estruturas de suporte em formato de colunas, perpendiculares ao plano de impressão, que conectam diretamente a face, que anteriormente se apresentava suspensa, à mesa aquecida ou a outra superfície anteriormente depositada, demonstrado na Figura 15(A) com uma peça de áreas suspensas e na Figura 15(B), a peça com estruturas de coluna.

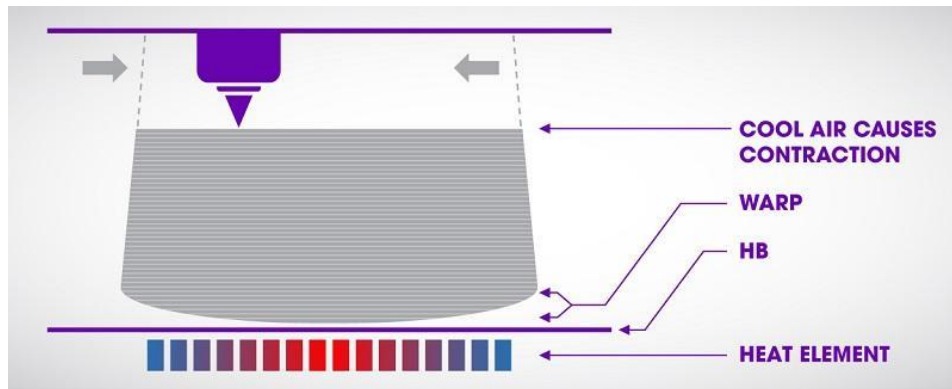
Figura 15 - Exemplo de modelos com suporte



Fonte: Próprio Autor

Um defeito muito comum que interfere no sucesso de um componente fabricado por manufatura aditiva é chamado empenamento, que consiste no encurtamento e arredondamento dos contornos externos das camadas iniciais, resultando na alteração de altura, paralelismo, perpendicularidade entre as superfícies da peça final. O empenamento em casos severos pode ser responsável pelo desprendimento total da peça da mesa aquecida. Este ocorre dentre outros motivos, pela interação do ar (exemplificado na Figura 16) com o material recém depositado, onde o resfriamento força a contração do polímero e cria tensões estruturais (RIGID INK, 2016).

Figura 16 - Fenômeno de empenamento



Fonte: Adaptado de (RIGID INK, 2016)

3 METODOLOGIA

O fluxograma representado na Figura 17 descreve a sequência de execução deste trabalho, englobando as etapas de seleção de projetos, alterações e melhorias, planejamento de processo, fabricação e validação.

Figura 17 - Fluxograma de trabalho



Fonte: Próprio Autor

A primeira etapa do trabalho foi a realização de um *benchmarking* acerca de manipuladores existentes com finalidade didática e quais recursos estes oferecem. Por meio das principais plataformas de compartilhamento de projetos na internet, procurou-se trabalhos que possam atender as demandas do curso de engenharia mecatrônica.

Os manipuladores de código aberto foram avaliados observando além dos recursos anteriormente exemplificados nos produtos comerciais, por sua quantidade e qualidade documentação, disposição do conhecimento técnico para a execução dos mesmos, como softwares de modelagem 3D da estrutura ou programação de controle, e de materiais acessíveis na instituição para a construção do manipulador.

Os manipuladores foram agrupados e suas principais características foram listadas na forma de tabela para facilitar o processo de escolha em função das necessidades deste trabalho. A escolha também foi baseada em função da máquina disponível na instituição para a fabricação dos componentes a partir de filamento fundido, bem como o tipo de material polimérico escolhido para o mesmo.

Com a seleção do projeto, iniciou-se um estudo da estrutura e mecanismos do manipulador, utilizando toda a documentação fornecida pelos autores. Esta etapa teve como objetivo adaptar as soluções de funcionalidade e execução para o contexto atual das máquinas e ferramentas disponibilizadas na instituição. Neste momento também, foi levado em consideração o contexto de acessibilidade a componentes no mercado brasileiro, tanto pelos materiais já obtidos previamente no campus como a facilidade de compra e eventual reposição no mercado. Ao término, desta etapa obteve-se um projeto revisado com alterações de alguns elementos propostos.

Na etapa seguinte, de planejamento do processo, foram definidos parâmetros de impressão e a viabilidade de fabricação das peças com base em estudos preliminares. Questões como a criação/remoção de estruturas de suporte ou separação de componentes que apresentam tamanhos consideráveis em relação ao volume de trabalho.

Com a definição dos parâmetros, realizou-se a fabricação dos componentes por manufatura aditiva e pós processamento das peças obtidas. Nesta

etapa, também foi realizada uma pré validação das dimensões das geometrias, pela montagem dos componentes.

A validação do manipulador foi realizada através de testes metrológicos nos quais foram avaliados: a distância entre eixos e planos das juntas, os alcances máximos das juntas e digitalizações de itens de interesse do funcionamento e rigidez do manipulador, como componentes que possuem geometrias que trabalham na transmissão de potência ou influenciam na linearidade entre elos.

4 **Benchmarking de manipuladores**

Segundo Carpes Jr. (2014) são denominados de produto todo objeto ou artefato concebido, produzido, negociado e utilizado por pessoas para satisfazer suas necessidades por meios das funções que ele realiza, incluindo os valores que estão agregados a ele (estética, status social, etc.). O termo função compreende ações ou tarefas executadas intencional e deliberadamente pelo produto, devido à habilidade para transformar o ambiente, ou seja, mudar algo da forma desejada.

Ainda segundo o autor, o projeto de produto é um processo desenvolvido por pessoas, com o auxílio de meios técnicos dentro de um contexto social, por meio do qual a informação na forma de requisitos é convertida em informações na forma de descrição de um produto que deve satisfazer as necessidades, os desejos e as expectativas das pessoas. Durante este processo são antecipadas as necessidades e problemas de desenvolvimento, manufatura, montagem, garantia de qualidade, testes, *marketing*, entre outros.

Foram levantados alguns requisitos no curso de engenharia mecatrônica do IFSC campus Florianópolis referentes a quais características suprem suas necessidades. Um dos aspectos de interesse para um manipulador robótico é sua capacidade de integração com outros equipamentos. Esta integração vai desde compartilhamento de sinais, como leitura de sensores de presença, recebimento de comandos como a própria integração física, das posições de alcance do robô e capacidade de manipular objetos com determinadas massas.

4.1 **Projetos de manipuladores didáticos**

Diversos produtos e projetos voltados ao ensino de robótica estão disponíveis no mercado. Usando como base uma das etapas de projeto de produto conhecida como *benchmarking*, a pesquisa e avaliação de produtos similares é realizada a fim de reconhecer e enumerar as características e qualidades atribuídas a produtos do mesmo segmento.

Robôs comerciais com fins didáticos existentes se diferenciam entre número de eixos, material fabricado, tipo de comunicação e programação, modularidade de sua estrutura entre outros.

Para realizar a avaliação dos manipuladores, foram observadas algumas características, de acordo com as necessidades para o uso didático. Observou-se também os tipos de controladores e linguagem de programação, que influenciam diretamente na funcionalidade e facilidade de operação do robô. Foram contabilizadas as saídas extras do controlador visão potenciais de expansão na utilização de sensores ou atuadores a mais. Por fim, foram observados o peso do manipulador, custo, o material de sua estrutura e a capacidade de carga manipulada.

Existem duas categorias de projetos de robôs para fins didáticos, os comerciais e de código aberto (*open source*).

4.1.1 Produtos comerciais

Devido ao interesse da indústria na área de robótica, várias empresas apostam no segmento de comercialização de kits de manipuladores didáticos, visando o mercado crescente de cursos na área de mecatrônica. Estes kits proporcionam uma experiência mais simplificada dos recursos disponíveis em robôs industriais, com interfaces amigáveis que permitem realizar tarefas simples como apenas manipulação, ou em *softwares* mais complexos, desenhos e até impressões 3D.

4.1.1.1 Lynxmotion AL5D

A empresa *Lynxmotion* foi fundada em 1995 se compromete na fabricação e distribuição de kits didáticos de alta qualidade, com intuito de ensinar os princípios de robótica pelo mundo. O modelo de manipulador atualmente ofertado pela companhia é o AL5D PLTW (Figura 18), que possui de quatro graus de liberdade, uma garra de efetuador final e seus atuadores são servo motores.

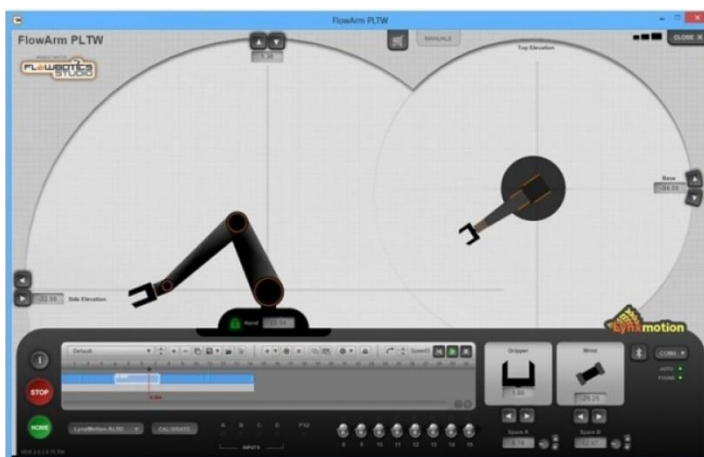
Figura 18 - Manipulador AL5D-PLTW



Fonte: Adaptado de (ROBOTSHOP, 2018)

O manipulador dispõe de um software de comando denominado *FLOWARM* (Figura 19), que oferece uma interface gráfica e linguagem de programação dos movimentos do robô por blocos (*flowstone*). O sistema eletrônico é composto pelo controlador SSC-32U, que é a placa de interface dos motores e possui oito saídas analógicas I/O.

Figura 19 - Interface do software FLOWARM



Fonte: Adaptado de (ROBOSHOP, 2018)

4.1.1.2 Sunfounder - 4-Axis DIY Wooden Robotic Arm

Ofertado como uma optativa extremamente barata em relação a outros modelos, o manipulador da empresa *Sunfounder* (Figura 20) utiliza servo motores de baixo custo e a estrutura dos elos do robô fabricadas em madeira de corte à laser.

Figura 20 - Manipulador Sunfounder



Fonte: Adaptado de (ROBOTSHOP, 2018)

Com quatro graus de liberdade, o kit conta com uma versão aberta do *board Arduino UNO*, numa versão manufaturada pela própria *Sunfounder*. O comando do robô pode ser feito tanto por comando de um *joystick* integrado como pelo *software Labview*, que é difundido no cenário industrial atual.

4.1.1.3 Dobot MAGICIAN

A companhia chinesa *Dobot* oferece o kit DOBOT MAGICIAN (Figura 21), que tem como proposta ser um manipulador robótico de mesa multifuncional para educação prática. Com quatro graus de liberdade e precisão de 0,2mm em seus movimentos, o robô oferece tarefas como desenho e escrita, gravação à laser de materiais como madeira, impressão 3D entre outros.

Figura 21 - Manipulador DOBOT MAGICIAN



Fonte: Adaptado de (DOBOT, 2018)

Com o intuito de possuir a interface mais amigável ao usuário, o manipulador possui aporte a diversos softwares de comando, tanto de código aberto como o *Repetier Host*, *GrlbController* 3.6 como o *software* gratuito disponibilizado pela empresa *DobotStudio*.

4.1.2 Avaliação manipuladores comerciais

Após obtenção dos recursos de cada manipulador, os dados coletados de cada foram dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Recursos manipuladores comerciais

Modelo	Lynxmotion	Dobot Magician	SunFounder DIY ARM
Graus de liberdade	4	4	4
Material	Alumínio	Alumínio	Madeira
Payload (carga)	250g (aprox)	500g (aprox)	200g (aprox)
Peso	908g	4000g	540g
Alcance	508mm	320mm	150mm
Custo (FOB)	USD \$329.00	USD \$1199.00	USD \$72.90
Tipo de Atuador	Servo	Servo	Servo
Controlador	SSC-32U	Dobot Integrated Controller	Sunfounder Mars (Arduino UNO)
Saídas Extras	8 analógicas I/O	10 analógicas ou PWM	0
Programação	FlowArm PLTW	DobotStudio	Labview

Fonte: Próprio autor

Pôde-se observar algumas características comuns a eles, onde os graus de liberdade disponíveis são 4, e seu tipo de atuador são servo motores. O alcance

médio é de 300mm e a capacidade de carga varia, porém, o comum gira em torno de 200g. Pôde-se observar que o custo é influenciado diretamente pelo material da estrutura e pelo controlador utilizado, porém se reflete também nos recursos disponíveis nos *softwares* utilizados para comando dos manipuladores.

4.1.3 Projetos *open source*

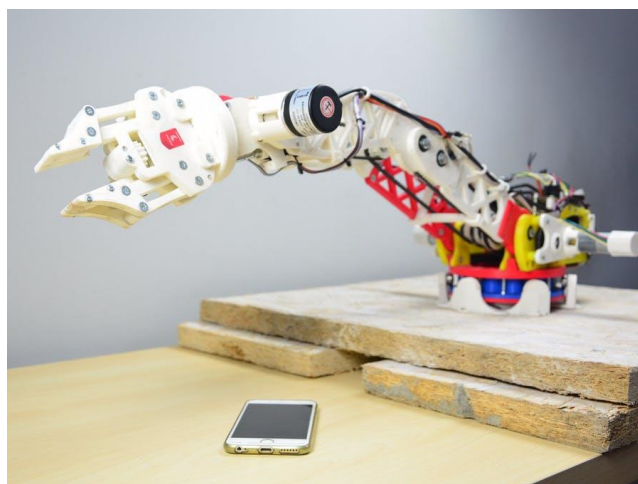
Estão disponíveis em diversos repositórios na internet (a saber: *Grabcad*, *Thingiverse*, etc) projetos abertos de manipuladores robóticos, muitos destes originados de trabalhos acadêmicos em diversas instituições pelo mundo. O principal impacto dos projetos serem abertos a outros usuários é a capacidade de correção de projetos e o constante aprimoramento dos mesmos, como por exemplo dos casos de manipuladores, que recebem suporte de adequações tecnológicas de eletrônica, *software* e adaptações de suas estruturas.

Dos projetos analisados, levou-se em consideração o seu escopo mecânico de alcances e carga de trabalho, eletrônica e *software* disponíveis, a capacidade de alteração do projeto. Também observou-se a disponibilidade de materiais e capacidade técnica de execução na instituição.

4.1.3.1 *hRobot*

O manipulador *hRobot* (Figura 22) é um projeto que foi desenvolvido com requisitos de possuir uma estrutura não muito complexa no ponto de vista de fabricação, abrangendo uma maior quantidade de usuários, podendo ser manufaturado nas mais simples configurações de impressora 3D.

Figura 22 - Manipulador *hRobot*



Fonte: Adaptado de (HACKSTER.IO, 2017)

O grande diferencial do projeto é a utilização do controlador *husarion CORE2-ROS*, que suporta o *framework* aberto ROS (*RobotOperating System*), para Linux, que é uma junção de diversas bibliotecas e ferramentas para comando de robôs. A iniciativa visa simplificar a tarefa de criar o comportamento de um robô complexo e robusto da forma mais modular possível. O pacote é voltado para diversas áreas da robótica, como a de robôs móveis, manipuladores ou integração de sistemas como visão, conexão com a internet entre outros (ROS, 2018).

4.1.3.2 Thor

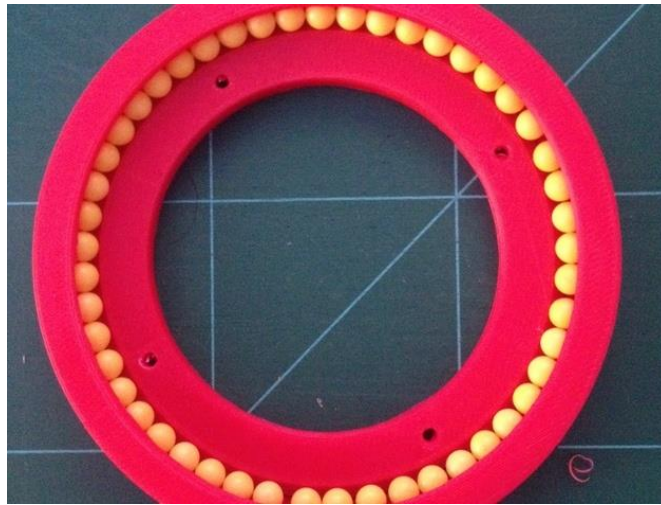
O projeto *Thor* (Figura 23) foi submetido pelo usuário *AngellM*, resultado de seu trabalho de conclusão de curso em Madrid, Espanha (*Universidad Politécnica de Madrid*). A proposta foi criar um manipulador de seis graus de liberdade para ser utilizado em universidades e escolas e possui como diferencial a característica de *payload* maior que outros manipuladores voltados para a o segmento, onde robôs comumente possuem capacidade de carga de 500 gramas e o manipulador *Thor* se propõe até 750 gramas.

Figura 23 - Manipulador Thor



Fonte: Adaptado de (HACKADAY, 2016)

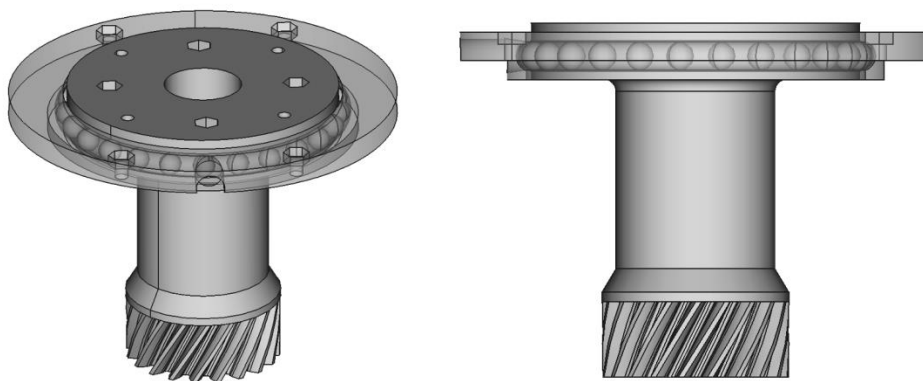
O desenvolvimento deste projeto envolveu muito da concepção mecânica e eletrônica baseada em robôs comerciais e em outras soluções *open source*, exemplo a utilização de um rolamento de esferas (Figura 24) não comercial, feito de material plástico, fabricado em uma impressora 3D e utilizando esferas de *Airsoft* como elemento rolante.

Figura 24 - Rolamento *OpenSource*

Fonte: Adaptado de (THINGVERSE.COM, 2015)

Este é um exemplo de como a abertura e disseminação de projetos influenciam toda uma cadeia de criação, onde baseado em uma solução disponível em repositório aberto, o projeto Thor remodela e adapta o componente à sua necessidade (Figura 25), trazendo melhorias para o projeto e facilitando a sua execução e inclusive reduzindo parte do custo destinado ao mesmo.

Figura 25 - Rolamento adaptado ao eixo



Fonte: Adaptado de (HACKADAY, 2016)

4.1.3.3 BCN3D Moveo

Iniciada como um projeto da fundação CIM, a empresa BCN3D tem como objetivo a difusão da manufatura digital, com atuação focada principalmente em manufatura aditiva, possuindo diversos modelos de impressoras comerciais e muitas delas, com projeto disponibilizados para o público em forma de código aberto.

O manipulador *Moveo* (Figura 26) foi desenvolvido a partir de uma demanda da *Universitat Politècnica de Catalunya*, com intuito de ofertar à seus alunos de graduação nas áreas de STEM (Ciência, tecnologia, engenharia e matemática) um material didático para a área de robótica sendo de fácil acesso, de custo reduzido e que fosse de simples replicação. Ele se baseia em outro projeto também aberto de um manipulador desenvolvido por *Andreas Hölldorfer*, disponível em diversas plataformas de compartilhamento, em especial o repositório *GitHub*.

Figura 26 - Manipulador Moveo



Fonte: Adaptado de: (CULTS 3D, 2018)

Pela plataforma *GitHub*, qualquer usuário tem acesso à todas as informações necessárias para a fabricação do modelo, desde os modelos STL para impressão, CAD para facilitar alterações, BOM (*bill of materials* - lista de materiais), firmware para embarcar o micro controlador e manual do usuário, que contempla instruções de montagem, de programação e operação do robô, elemento que mostra o comprometimento do projeto.

4.2 Seleção do manipulador

Utilizando as características já observadas para manipuladores comerciais, elaborou-se a tabela 2, que contém os dados acerca dos manipuladores

open source. Os robôs de projetos abertos apresentaram mais graus de liberdade do que os kits didáticos, alcances similares e mais carga e na maioria dos casos, um custo maior. Porém, a grande vantagem dos manipuladores *open source* é a capacidade de expansão de recursos, tendo vista que bibliotecas com diversas funcionalidades como criação de trajetórias, sistema de visão, etc., estão aparecendo com maior frequência na *internet*, juntamente com documentação auxiliando sua implementação.

Tabela 2 - Recursos manipuladores *open source*

Modelo	hRobot	Thor	MOVEO
Graus de liberdade	5	6	5
Payload (carga)	500g (aprox)	750g	500g (aprox)
Alcance	700mm	300mm	400mm
Tipo de Atuador	Servo + DC (com Encoder)	Passo	Passo
Controlador	Husarion CORE2	Arduino MEGA 2560	Arduino MEGA 2560
Programação	ROS	GRBL (Adaptado)	GRBL (Adaptado)
Material para fabricação	2000g (aprox)	4000g (aprox)	3000g (aprox)
Arquivos CAD	(Apenas STL)	STL e STEP(FreeCAD)	STL e SLDPRPT (SolidWorks)
Custo (FOB)	\$ 236,1 (SEM FILAMENTO)	€350 (SEM FILAMENTO)	R\$ 3.131

Fonte: Próprio autor

Com os recursos dos projetos dispostos, o manipulador selecionado foi MOVEO, da BCN3D, retirado do *site GitHub*. A escolha se fez entendendo que todas as características do manipulador são suficientes para o seu uso na instituição, como alcances, cargas e por utilizar um controlador já difuso no meio acadêmico do curso de engenharia mecatrônica, que é a placa *Arduino*. Também levado em consideração a modelagem dos arquivos CAD serem realizados no software *SolidWorks*, programa este com licença disponível na instituição, o que facilitou a edição de recursos e adaptações de geometrias.

Observou-se também a enorme popularidade do projeto, sendo replicado por diversos usuários com documentação do mesmo não apenas na plataforma *GitHub*, mas em forma de vídeos e em fóruns sobre robótica na rede.

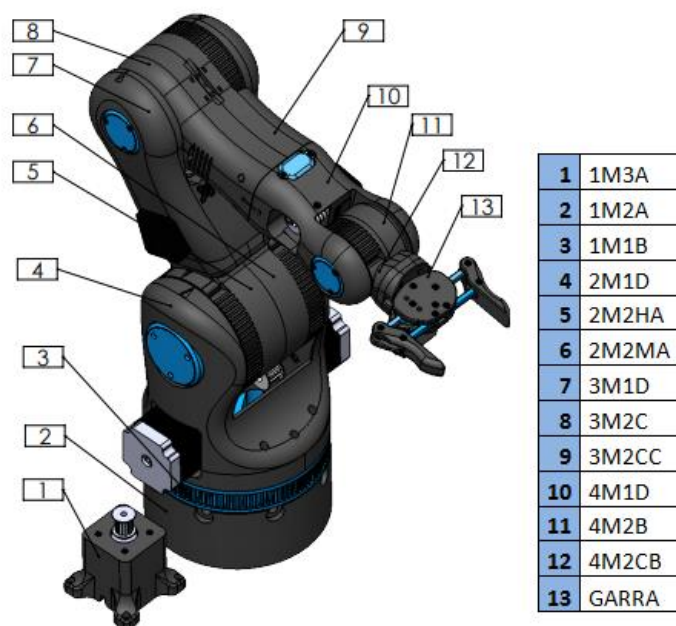
5 Melhorias e Alterações

5.1 Projeto original MOVEO

O projeto do manipulador MOVEO (Figura 27) utiliza majoritariamente componentes fabricados por manufatura aditiva. Os componentes que são sugeridos a serem obtidos comercialmente são seus fixadores, motores, que aqui são de passo, rolamentos, correia sincronizadora e polias de alumínio com 10 e 14 dentes.

O projeto propõe o uso da manufatura aditiva para soluções de transmissão de potência, onde as peças que compõe as juntas possuem geometrias que formam o perfil de dentes de polias sincronizadoras, no caso trapezoidais métricas de passo 5 mm.

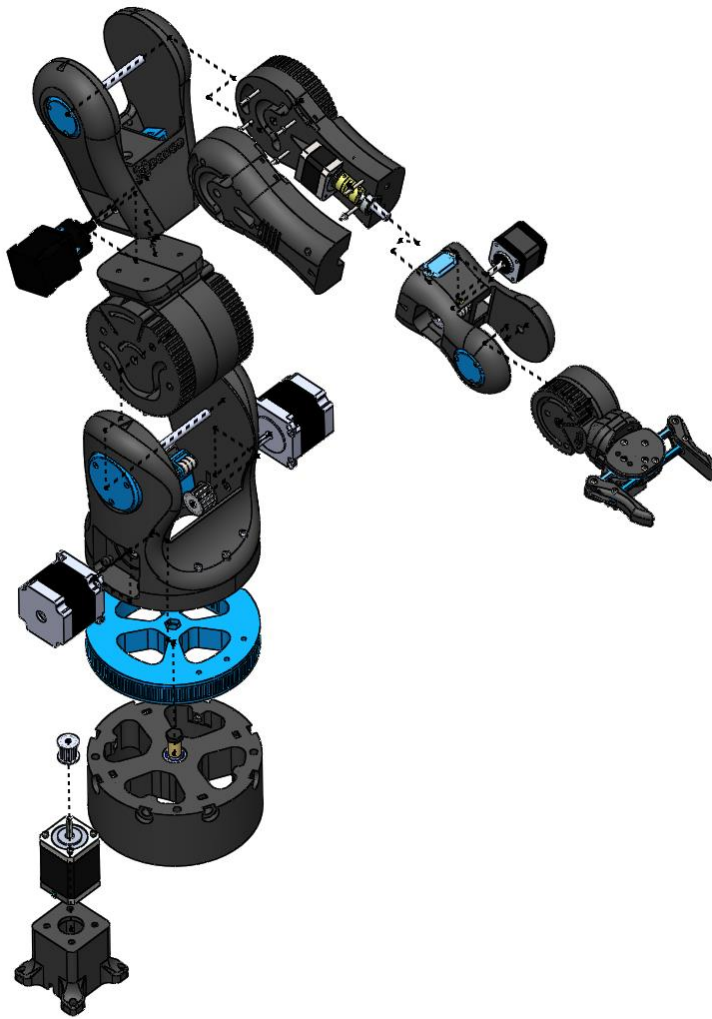
Figura 27 - Manipulador MOVEO original



Fonte: Próprio autor

A Figura 28 demonstra uma vista explodida da montagem do manipulador, dando uma noção da quantidade de componentes e algumas posições relevantes, como a dos motores e dos eixos.

Figura 28 - Vista explodida MOVEO

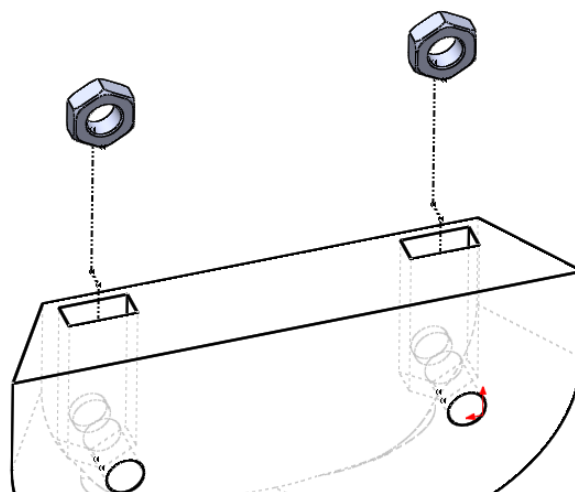


Fonte: Próprio autor

5.2 Fixações na montagem

Por meio do modelo 3D, desenvolvido em software CAD, foi possível compreender a solução utilizada para os elementos do manipulador. A solução apresentada pelos autores em diversos componentes é a de utilizar conjunto de porcas e parafusos, sendo a porca inserida em canais com ajuste mecânico com folga como pode ser visto na Figura 29.

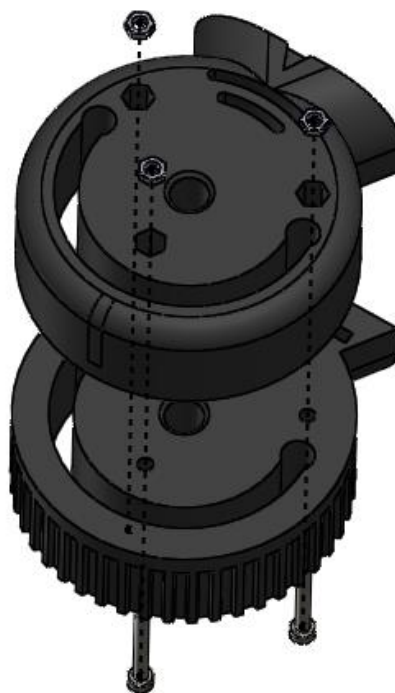
Figura 29 - Ajuste de montagem porca



Fonte: Próprio Autor

Outras uniões por porca e parafuso que também dependem da dimensão de canais com geometrias restritas também são presentes, conforme Figura 30. Detectando que algumas destas poderiam vir a ser um problema, procurou-se soluções comerciais e práticas para substituí-los.

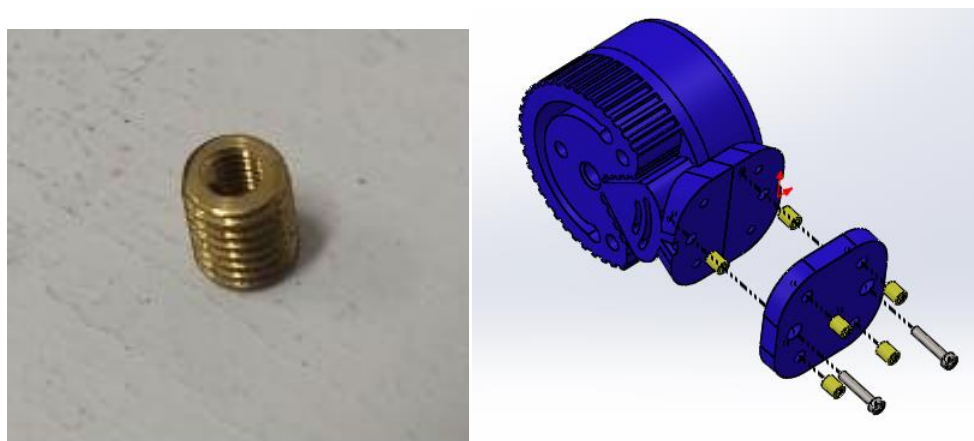
Figura 30 - União por porcas da junta 5



Fonte: Próprio Autor

Por disponibilidade de mercado, umas das soluções encontradas é a substituição das porcas por insertos roscados (mostrado na Figura 31), de latão, fixados permanentemente na posição de fixação anteriormente ocupada por porcas, mantendo a possibilidade de montagem e desmontagem dos elementos, não afetando sua funcionalidade nem geometria, alterando somente o tamanho dos furos originais para a instalação dos insertos.

Figura 31 - Inseto Roscado e aplicação



Fonte: Próprio Autor

5.3 Adaptações comerciais

Para garantir a execução e a facilidade de replicação do manipulador em oportunidades posteriores, estudou-se os componentes comerciais presentes e a utilidade dos mesmos. Poucas alterações foram necessárias, tendo em vista que os desenvolvedores originais do projeto já se atentaram a utilizar componentes mecânicos e eletroeletrônicos de amplo acesso. Das poucas mudanças realizadas no projeto em relação aos elementos comerciais, as principais foram relacionadas ao acesso dos mesmos, onde a substituição se deu pela quase inexistência de obtenção dos componentes no mercado nacional.

Um componente substituído foi o motor responsável pela movimentação da junta do punho, motor de passo de flange padronizada Nema 14. Este tipo de tamanho de motor não é muito utilizado em território nacional, podendo ser facilmente ser substituído por motores com tamanho um pouco superior, com mesma ou inferior massa e mesma potência. Na Tabela 3, estão listadas as especificações do motor Nema 14 sugerido no projeto, ao lado das especificações de um motor Nema17 proposto.

Tabela 3 - Parâmetros de comparação motores Nema 14 e Nema 17

Modelo	SM35HT36	17HD34008-22B
Flange	Nema 14	Nema 17
Torque	0,14Nm	0,32Nm
Ângulo do passo	1,8°	1,8°
Peso	180g	230g
Corrente	1A	1,5A
Tensão de operação	2,7V	4,8V

Fonte: Próprio Autor

Tendo em vista que a substituição do motor pôde ser validada, adaptou-se o componente 4M1D, que dentre as funções estruturais é o componente responsável pelo posicionamento e fixação do motor da junta do punho. Como resultado da adaptação para o motor Nema 17, o componente teve sua dimensão acrescida longitudinalmente, porém, as outras posições relativas resultantes da montagem se mantiveram. A Figura 32(A) apresenta o componente 41MD de dimensões originais e a Figura 32(B) mostra o mesmo componente com o alojamento do motor alterado

Figura 32 - Alteração peça 4M1D motor de passo

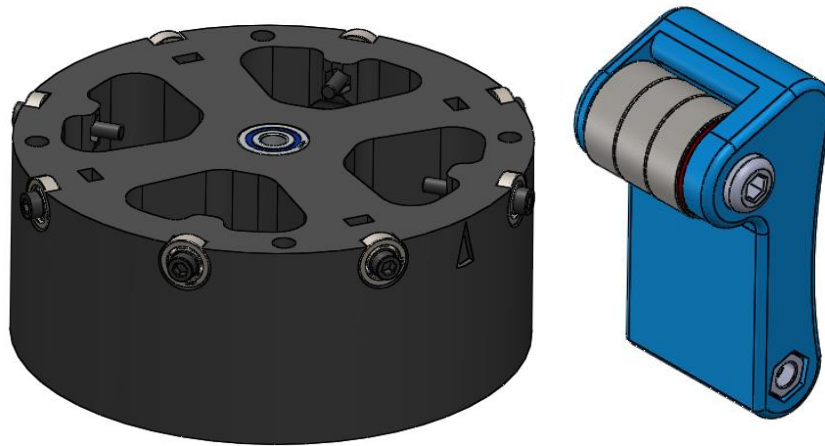


Fonte: Próprio Autor

Outros componentes comerciais analisados foram os rolamentos. O manipulador utiliza não só estes elementos para fixar a posição dos eixos e suporte

de carga, mas como elementos rolantes nos mecanismos responsáveis por tensionar as correias sincronizadoras(Figura 33(B)) e como guias para a junta rotativa da base (Figura 33(A))

Figura 33 - Junta 1 rotativa e modelo de tensionador



Fonte: Próprio Autor

Devido a disponibilidade de ferramental na instituição, optou-se por fabricar por torneamento elementos substitutos com dimensões idênticas, em forma de disco, que conseguem atender a mesma função, fabricados em poliacetal.

6 Planejamento do Processo

6.1 Características da impressora 3D disponível

Para a fabricação dos componentes foi utilizada a impressora de modelo comercial *ROSTOCKMAX V2* (Figura 34), com configuração delta, possuindo um bico extrusor de 0,5mm e base aquecida com temperatura controlada. O software selecionado para comandar a máquina, bem como preparar as trajetórias de impressão das peças é o *MatterControl* que é *open source*.

Figura 34 - ROSTOCKMAX V2



Fonte: Adaptado de: (3D HUBS, 2018)

O primeiro item a ser observado da máquina foi seu volume de trabalho, verificando se a impressora poderia comportar as peças a serem fabricadas sem a necessidade de separação das mesmas. O modelo *ROSTOCKMAX V2* possui dimensões de trabalho de 275 mm de diâmetro e 385 mm de altura. Outros recursos da impressora estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Recursos ROSTOCK V2

Preço (FOB)	\$999
Volume de trabalho	280mm diâmetro×375mm
Tipo da mesa	Vidro, aquecida
Tamanho de filamento	1,75 mm
Controle de Temperatura	Sim, Extrusor (240°C max)
Controle Embarcado	Sim, Botoeira e LCD
Host/Slicer software	MatterControl
Sistema Operacional	Linux, Mac, Windows
Firmware	Repetier
Open Source	Sim
Decibeis em operação	61,2

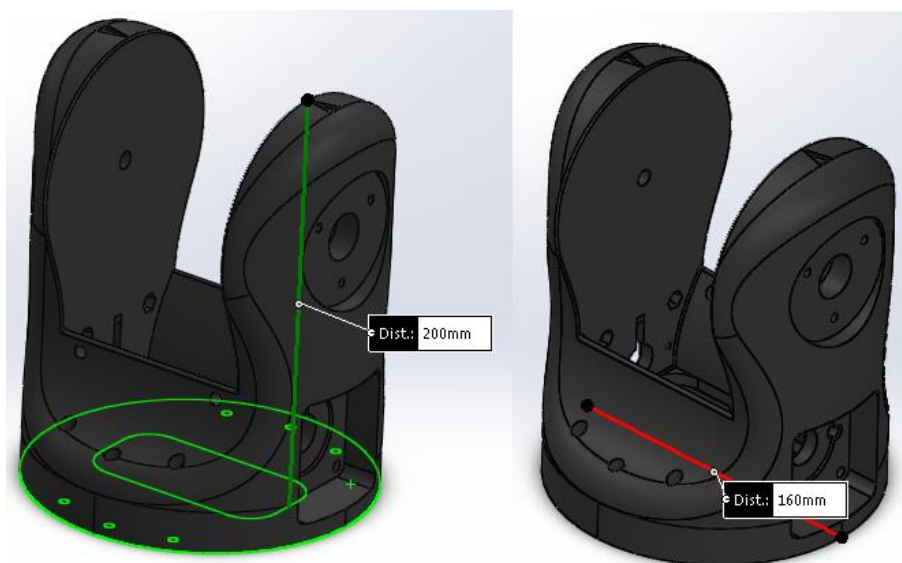
Fonte: Adaptado de: (MAKEZINE, 2015)

6.2 Tamanho das peças

Individualmente observando as dimensões de cada peça a ser fabricada, tentou-se prevenir o evento de separação de componentes por motivo de não serem comportados pelo volume de trabalho da impressora. A separação de peças também demanda o conhecimento da junção novamente das mesmas, sendo por fixadores ou por cola.

A maior peça a ser fabricada foi a denominada 2M1D (Figura 35) que compõe o elo do ombro do manipulador. Sua medida é de 160 mm de diâmetro e 200 mm de altura, sendo assim, comportada pela máquina.

Figura 35 - Peça 2M1D, dimensões máximas



Fonte: Próprio Autor

Para o início da fabricação é necessário calibrar o nível da mesa, o plano XY normal ao eixo Z que é o sentido da deposição do material. Este ajuste é feito periodicamente, neste caso de maneira mecânica, e é realizado devido a variações que o conjunto estrutural pode sofrer, originado de diversas fontes como temperatura, umidade e o próprio uso do equipamento.

6.3 Parâmetros de impressão e Setup

Para dar início à fabricação, primeiramente foi necessário a definição dos parâmetros de impressão, valores estes, sugeridos pelo fabricante do material polimérico para o material utilizado PLA (poliácido láctico) apresentados na Tabela 5.

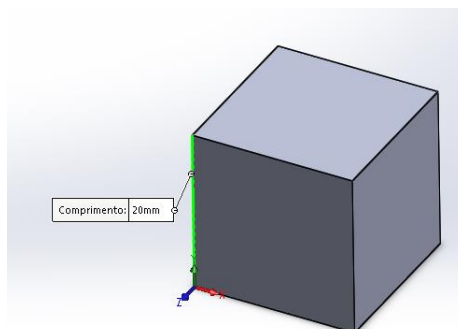
Tabela 5 - Parâmetros de Impressão

Diâmetro do Bico	0,5 mm
Temperatura do Bico	205 °C
Temperatura da Mesa	65 °C
Altura de camada	0,3mm
Densidade do Preenchimento	30%
Tipo de Preenchimento	GRADE
Velocidade de Preenchimento	60mm/s

Fonte: Próprio Autor

Com a definição dos parâmetros, foi realizada uma primeira impressão de uma peça de calibração para garantir que as configurações da máquina estejam corretas, utilizando como teste um cubo de arestas de 20 mm (Figura 36). O intuito desta operação foi a de comparar as dimensões da peça fabricada com seu arquivo CAD, com resultados satisfatórios.

Figura 36 - Cubo de calibração

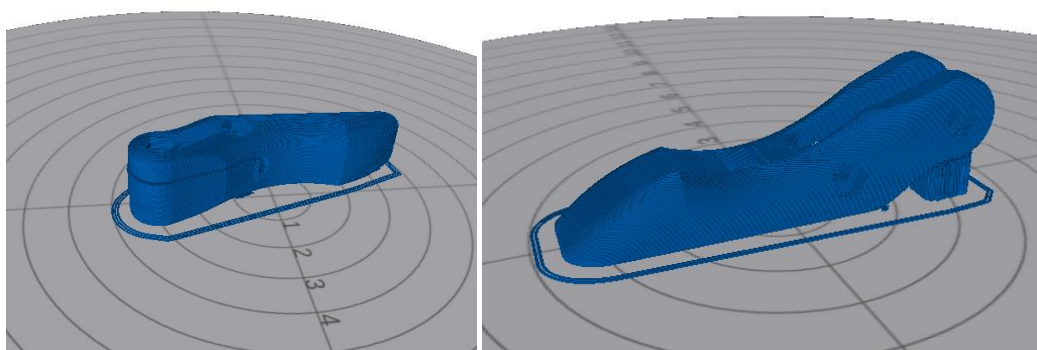


Fonte: Próprio Autor

6.4 Suportes

Antes de sua devida fabricação, todas as peças foram avaliadas a fim de evitar ao máximo a geração de estruturas de suporte desnecessárias. Algumas soluções se deram pela simples orientação da peça em relação ao plano de impressão (Figura 37), que trouxe maior economia de material. Estruturas de suporte são descartáveis e sua presença resulta num pior acabamento superficial do componente.

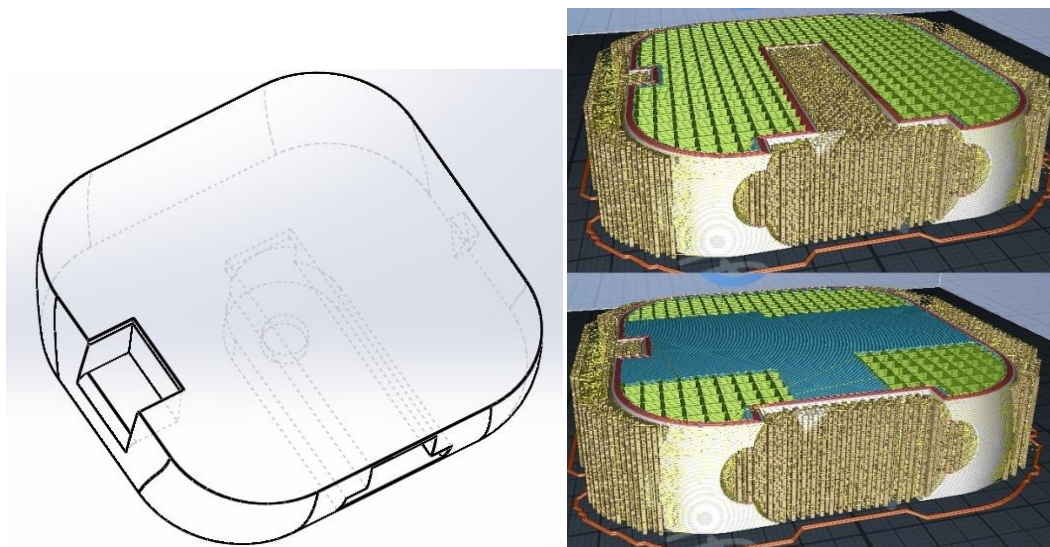
Figura 37 - Modelo de orientação de fabricação



Fonte: Próprio Autor

Outros componentes demandaram uma maior atenção e posteriormente o reprojeto de sua forma, tendo em vista manter a funcionalidade destinada à peça, exemplificado na Figura 38. Um dos critérios avaliados foi a viabilidade de remoção dos suportes, e como algum resquício poderia afetar o uso da peça.

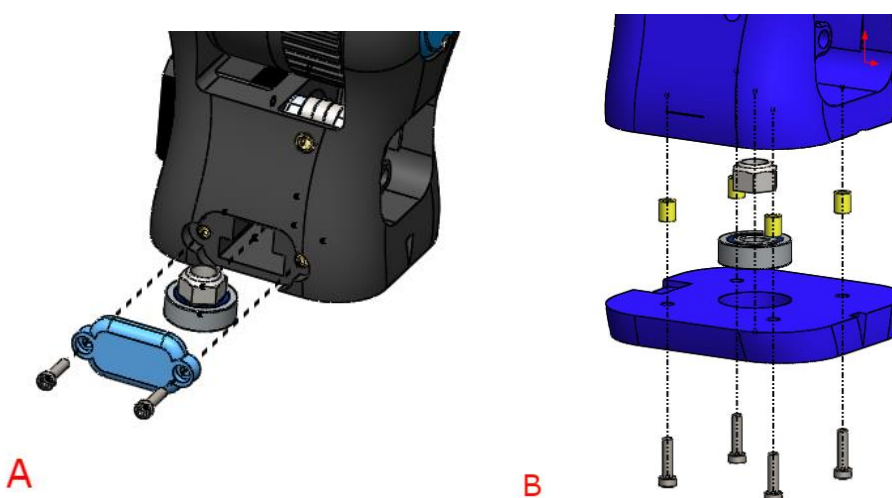
Figura 38 - Estruturas de suporte peça 4M2



Fonte: Próprio Autor

A única peça significativamente alterada do projeto, por motivo de suporte, foi a denominada 4M1D, que compõe o elo 3 do manipulador. Antes do re-trabalho, ela apresentava dois canais retos orientados para o posicionamento de uma porca de fixação e de um rolamento que suportava o eixo ligado à junta 4. A solução encontrada foi a divisão da peça por um plano cortante coincidente com a superfície superior do canal, não afetando a funcionalidade do componente, exposto na Figura 39(A), projeto original e Figura 39(B), alteração.

Figura 39 - Alterações Realizadas 4M1D

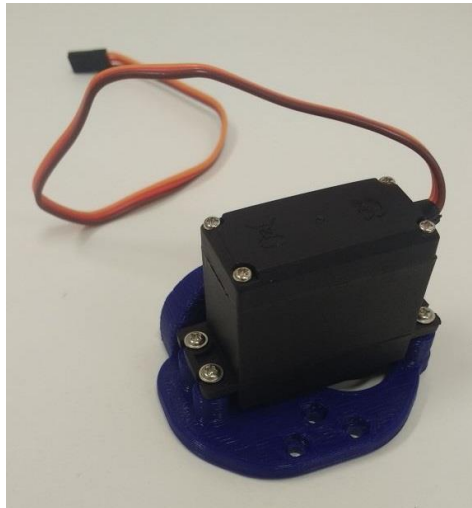


Fonte: Próprio Autor

7 Fabricação dos componentes por impressão 3D

O processo de manufatura aditiva se mostrou uma opção de fabricação muito válida na qual as alterações são de rápida e fácil implementação, seu funcionamento é intensamente automatizado e muitas características puderam ser confirmadas logo ao término da fabricação, como relações de montagem entre outras peças impressas ou como por exemplo na fixação dos motores, com dimensões de furação sem falhas, exemplo na Figura 40 que mostra a montagem de uma peça fabricada com um motor .

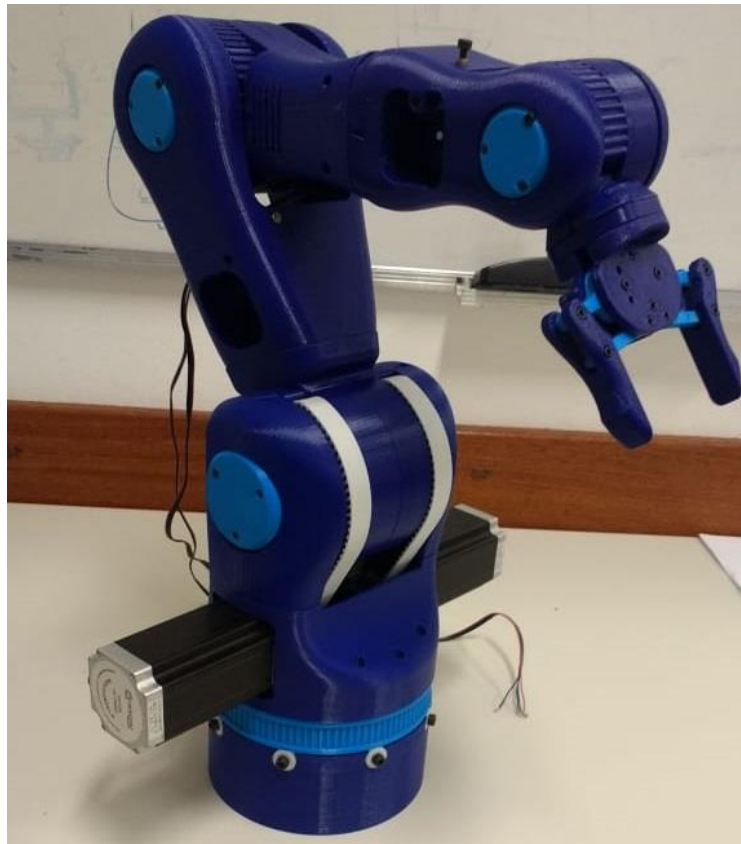
Figura 40 - Exemplo montagem prévia



Fonte: Próprio autor

As montagens preliminares do manipulador mostraram que com manufatura aditiva é possível atingir resultados satisfatórios de rigidez mecânica para fins didáticos cujo esforços de trabalho não são os mais extremos. A montagem do manipulador é retratada na Figura 41.

Figura 41 - Montagem Manipulador



Fonte: Próprio autor

Durante a fabricação e montagem de alguns componentes do manipulador, foram necessárias intervenções manuais para garantir o funcionamento dos quais foram projetados. Muito se deu ao fato da não capacidade de previsibilidade do fenômeno da contração cujas tensões inerentes ao processo de manufatura aditiva de materiais polimérico afetaram dimensões finais de geometrias principalmente nas peças de maior magnitude. A contração também afetou o início da fabricação de algumas peças, como mostra a Figura 42, aliado a falta de adesão, ocasionou no empenamento das mesmas, defeito que inviabiliza a continuidade da fabricação.

Figura 42 - Peça com empenamento

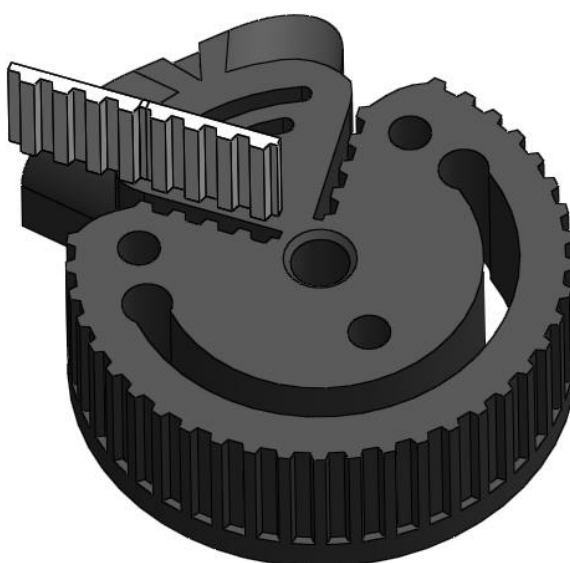


Fonte: Próprio autor

As principais geometrias afetadas foram as de funcionalidade de furos e alojamentos de rolamento nas quais a circularidade e a cilindridade não puderam ser adquiridas apenas com o processo de manufatura, sendo necessários retrabalhos tanto de furação e alargamento, como com retificações manuais.

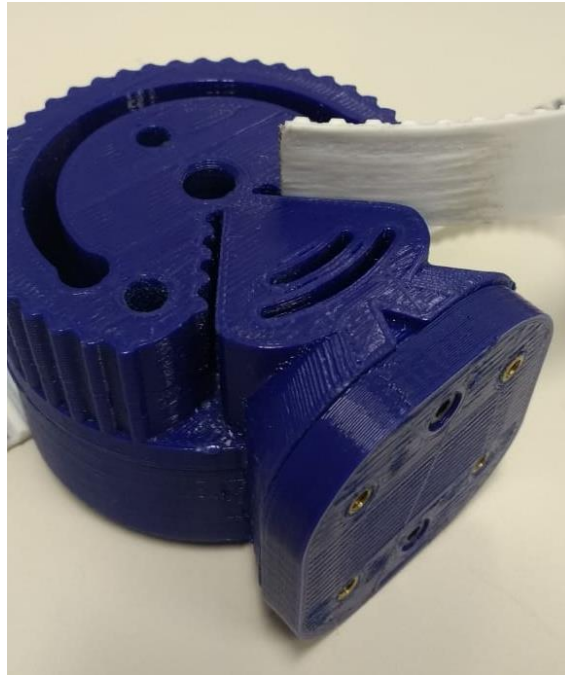
Por conta também da contração, a relação de montagem entre as correias e a geometria dos alojamentos (Figura 43) não montaram corretamente, então para solucionar este problema, avaliou-se entre a reimpressão das peças, usinagem dos alojamentos ou usinagem da superfície externa das correias, optando-se pela última, como mostra a Figura 44.

Figura 43 - Alojamento da Correia



Fonte: Próprio Autor

Figura 44 - Adaptação correia



Fonte: Próprio autor

Ainda em relação às correias, observou-se a não conformidade do engrenamento completo entre os elementos da peça impressa e da correia, retratado na Figura 45. Esta geometria foi posteriormente digitalizada, e pôde-se ter uma noção numérica do quanto a peça contraiu. Com testes de desempenho é possível efetivamente avaliar como este defeito influencia no movimento do manipulador.

Figura 45 - Engrenamento da correia



Fonte: Próprio autor

8 Avaliação do manipulador

8.1 Avaliação por medição por coordenadas

Para realizar os testes metrológicos do manipulador, foi utilizado um braço de medição por coordenadas do modelo *ROMER Absolute Arm* (Figura 46), com *scanner* integrado, disponível na instituição.

Figura 46 - Braço absoluto ROMER



Fonte: Adaptado de (ROMER, 2018)

Os ensaios envolveram o uso de esfera de apalpação de 6 milímetros de diâmetro e o uso de *scanner laser* que após digitalização da montagem e de peças de interesse, foram comparadas com as dimensões dos modelos 3D. O resultado entregue no ensaio metrológico é reflexo de entre outros fatores, das fontes de erro, podendo ser elas tanto da máquina utilizada para sua fabricação como da própria ferramenta utilizada para a medição.

Considerando o processo de manufatura aditiva sendo realizado por uma máquina ferramenta, segundo Stoeterau (2004, p. 105), uma máquina pode ser avaliada em função de sua estabilidade e repetibilidade. Suas fontes de erros são qualificadas segundo normativas que avaliam precisão geométrica em condições de trabalho, precisão e repetibilidade de posicionamento, avaliação de efeitos térmicos e emissão acústica.

8.2 Resultados Metrológicos

Os testes realizados são relacionados a questões qualitativas de fabricação e montagem, sendo comparadas as dimensões de projeto com resultados dos ensaios metrológicos, validando assim o conjunto do manipulador.

Os valores são o reflexo de diversas fontes de erro, tanto do processo de fabricação quanto do processo de medição.

8.3 Digitalizações

O braço de medição disponível na instituição possui a ferramenta de digitalização laser, e utilizando o *software polyworks* foi possível fazer a relação entre a malha de pontos digitalizada de partes fabricadas diretamente com seus modelos 3D. As peças de interesse digitalizadas foram aquelas cujas geometrias influenciam diretamente na funcionalidade dos mecanismos do manipulador.

Na Tabela 6 estão dispostas as dimensões nominais das polias utilizadas no projeto. Com base nestes valores são retiradas as relações de transmissão de potência que ocorrem entre as polias sincronizadoras e as peças que possuem as geometrias que se assemelham a polias.

Tabela 6 - Dimensões nominais das polias

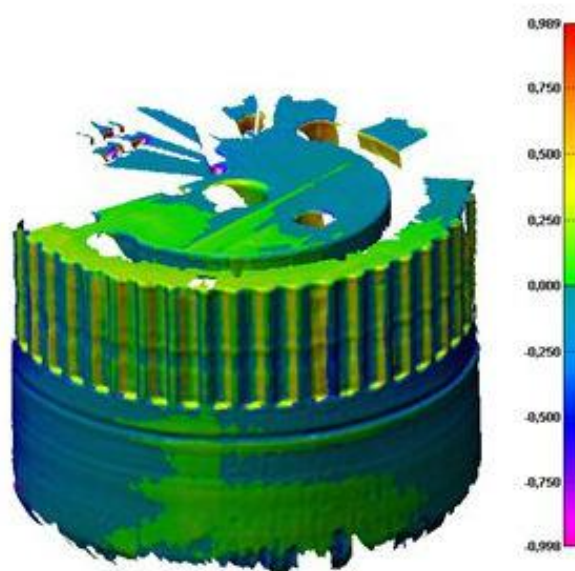
Peça	Diâmetro Primitivo	Diâmetro Externo	Número de Dentes
4M2CB	71,62	70	45
3M2CC	95,49	95	60
2M2HA	122,54	120	77
1M1B	159,15	158	100
Alumínio 10D	15,95	13,5	10
Alumínio 14D	22,28	19,8	14

Fonte: Próprio autor

O primeiro ensaio realizado está demonstrado na Figura 47. Esperava-se obter um resultado de até 1mm de diferença entre as geometrias. Este valor desejável foi baseado pela importância da superfície a ser medida, onde áreas externas que não possuem relações de montagem nem interferência no

funcionamento, poderiam apresentar diferenças de tamanho consideravelmente elevadas.

Figura 47 - Digitalização 42MCB

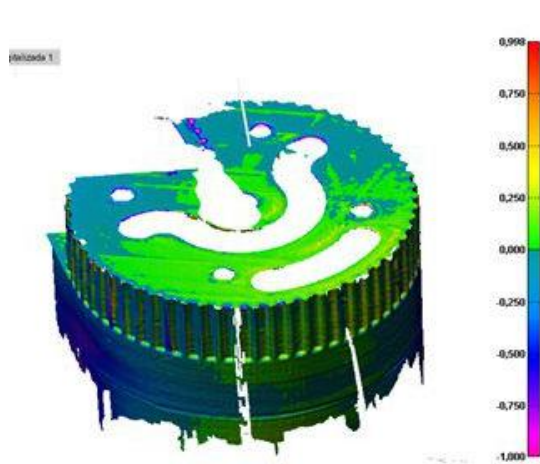


Fonte: Próprio autor

Analisando a legenda de cores, os valores máximos de variação apresentaram diferença máxima de 0,5mm, satisfazendo os critérios dimensionais.

A próxima peça avaliada foi a denominada 3M2CC, sendo a junta 3 do manipulador. Sua seleção se deu pelo fato de ter um diâmetro intermediário dentre as polias impressas.

Figura 48 - 3M2CC



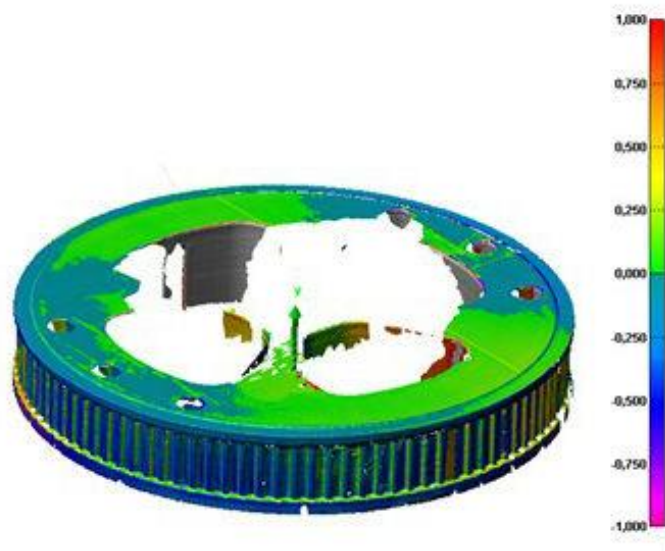
Fonte: Próprio autor

Pôde-se notar pela

Figura 48 que a variação de dimensões máximas de 0,25 mm, valores inferiores quando comparado com o teste da peça 42MCB. Atribui-se ao fato das tensões residuais de contração se dissiparem por um período maior de tempo, devido ao tamanho da peça.

A última peça avaliada foi a denominada 1M1B. Sua seleção se fez por ser a peça que possui a forma similar a de polia sincronizadora com o maior diâmetro.

Figura 49 - 1M1B



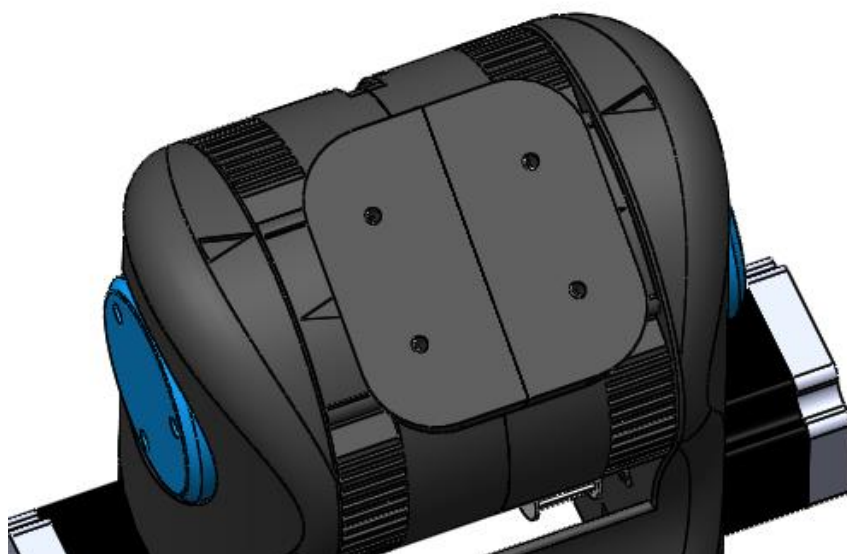
Fonte: Próprio autor

Conforme relatado anteriormente, a Figura 49 reafirma o conceito da contração ser minimizada para peças de diâmetros elevados, onde os resultados mostram as dimensões oscilando 0,25 mm.

O recurso de digitalização também foi utilizado para avaliar planicidade e paralelismo entre os componentes que compõe as juntas, exemplificado na

Figura 50. Foi escolhido avaliar esta característica pois eventuais desnivelamentos poderiam comprometer o alinhamento do manipulador.

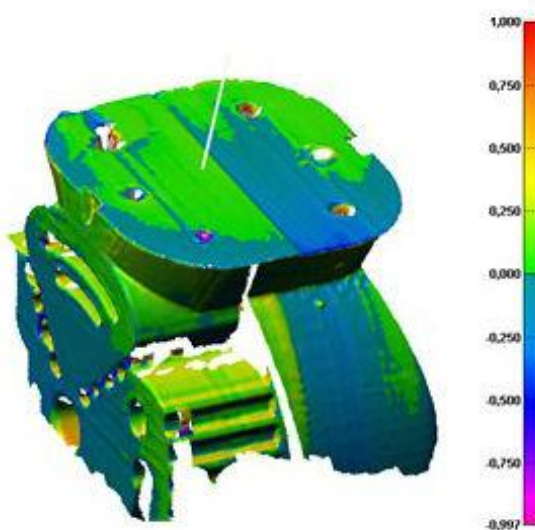
Figura 50 - Exemplo de montagem junta



Fonte: Próprio autor

A Figura 51 mostra o teste realizado para a junta 5, onde pode-se observar que as dimensões não variaram mais de que 0,25 mm.

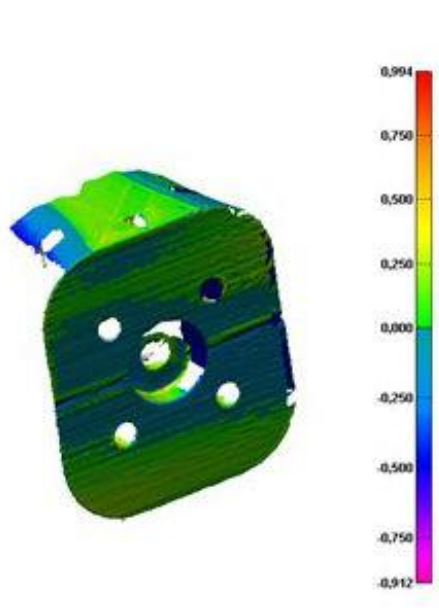
Figura 51 - Digitalização Planicidade Junta 5



Fonte: Próprio autor

O ensaio seguinte foi o realizado na junta 4, como mostra a Figura 52. Comparando com o teste realizado anteriormente com a junta 5, pode-se notar que a planicidade não é severamente afetada pela contração. Está atrelado este fato ao sentido de fabricação destas geometrias, onde os planos foram formados como sendo a superfície externa ao término dos contornos, criados pelo acréscimo em Z, diferente dos componentes que formam as polias, onde a deposição da forma se deu no plano XY.

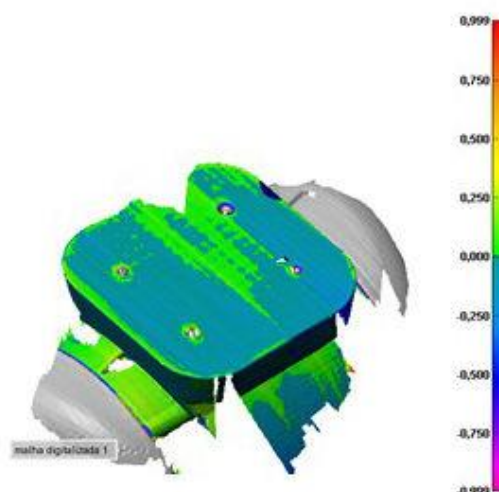
Figura 52 - Digitalização Planicidade Junta 4



Fonte: Próprio autor

Por fim, a digitalização da montagem da junta 2 (Figura 53) afirma que as dimensões da face são relativamente constantes, garantindo um plano para montagem dos elos.

Figura 53 - Digitalização Planicidade Junta 2

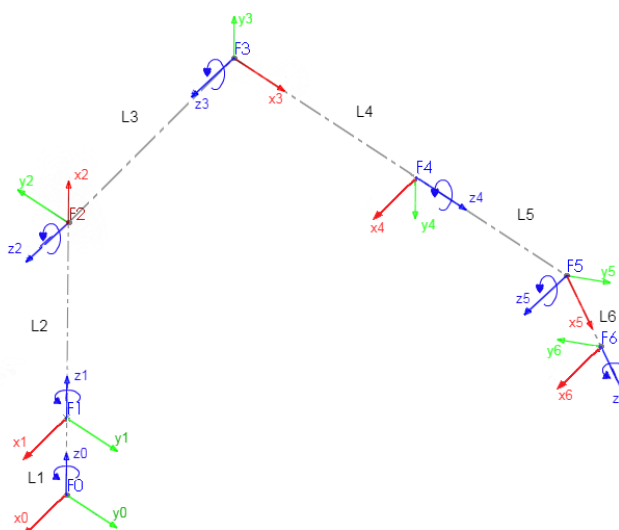


Fonte: Próprio autor

8.3.1 Dimensão dos elos

Para adquirir as dimensões dos elos do manipulador Figura 54 utilizou-se uma esfera de apalpação de 6 milímetros de diâmetro, sendo comparado valores de distância entre as circunferências dos eixos ou entre a distância normal às faces disponíveis. Os resultados são dispostos na Tabela 7

Figura 54 - Cadeia cinemática



Fonte: Próprio autor

Tabela 7 - Resultados tamanhos elos

	NOMINAL (MM)	MEDIDO (MM)	DIFERENÇA (MM)
L1	66,50	66,631	-0,13

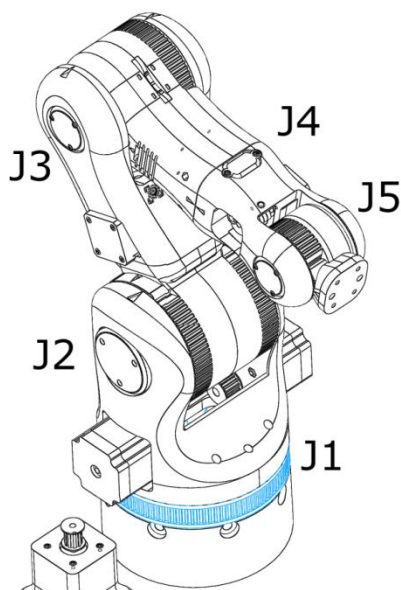
L2	165,00	165,069	-0,07
L3	221,12	219,700	1,42
L4	127,60	126,471	1,13
L5	105,00	105,218	-0,22
L6	48,00	47,467	0,53

Fonte: Próprio autor

8.3.2 Alcances

Para adquirir os alcances dos ângulos de cada junta do manipulador dispostos na Figura 55, utilizou-se uma esfera de apalpação de 6 milímetros de diâmetro, sendo comparados o ângulo do flange da ferramenta em posição de repouso com o ângulo após a movimentação do manipulador junta a junta em posição máxima e mínima. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

Figura 55 - Disposição das juntas



Fonte: Próprio autor

Tabela 8 - Alcances das juntas

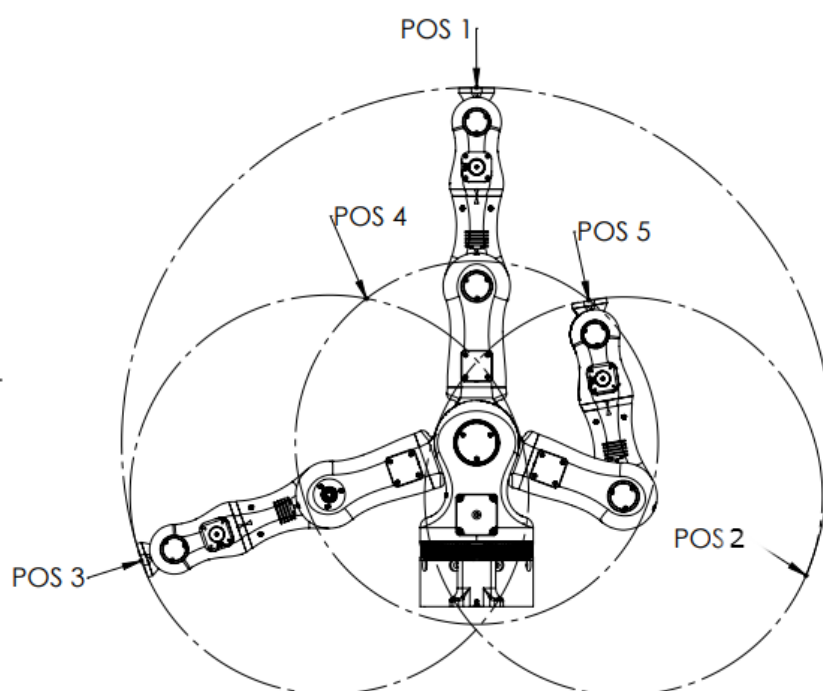
Juntas	Alcances (°)
J1	-121,340 até 121,340
J2	-104.008 até 104.008
J3	-95.500 até 111.752
J4	-104.760 até 147.577
J5	-98.280 até 104.643

Fonte: Próprio autor

Após a coleta dos dados de tamanhos dos eixos e dos alcances em ângulo das juntas, procurou-se na literatura comercial como os manipuladores industriais demonstram estas informações. Utilizando como base a folha de dados do robô ABB IRB 140, elaborou-se a

Figura 56, e conseqüentemente a Tabela 9, que relacionam posições de interesse do manipulador com coordenadas cartesianas. As posições demonstradas no geral são relativas ao comportamento do robô em seu volume de trabalho.

Figura 56 - Alcances manipulador



Fonte: Próprio autor

Tabela 9 - Alcances cartesianos

POS	Posição (mm) X	Posição (mm) Z	Ângulo Junta 2 (°)	Ângulo Junta 3 (°)
1	0	730,56	0	0
2	427,78	0	104,01	25,75
3	-427,78	0	-104,01	-25,75
4	453,93	177,09	-104,01	111,75
5	255,99	452,86	104,01	-95,5

Fonte: Próprio autor

9 Conclusões

O resultado do trabalho entrega um manipulador robótico capaz de atender demandas do curso de engenharia mecatrônica, com aplicações em diversas áreas de conhecimento técnico abordados, com custo aproximado de R\$ 3314,55.

O processo de fabricação utilizado se mostra como uma opção para manufatura rápida de componentes, onde o resultado das peças coincidiu com as demandas do projeto. Pode-se notar também que o uso do tempo de fabricação e de material não foi otimizado, onde cada peça foi construída individualmente, sendo que a máquina comportava a fabricação de mais componentes ao mesmo tempo, resultando num tempo total de impressão por volta de 88 horas.

Com a pesquisa e avaliação criteriosa do projeto a se fabricar, poucas alterações foram necessárias, e quando houveram, foram de simples implementação. Durante a pesquisa também pôde-se encontrar diversas soluções de eletrônica e de programas de comando, muitos softwares de código aberto e bem documentados.

Alguns testes possíveis não foram realizados, como avaliar velocidades ou comportamento de trajetórias, sendo a ausência relacionada à componentes comerciais, onde variações de tamanho, disponibilidade e prazos de entrega comprometeram o funcionamento do manipulador. Porém, os testes e ensaios que puderam ser feitos obtiveram bons resultados, validando a entrega de equipamento com muito potencial de aprendizado.

O fato da manufatura aditiva ser um processo de fabricação relativamente novo acarreta alguns empecilhos, como a escassez de opções de bibliografia, principalmente livros, mas não desmerece o processo, que vem sendo desenvolvido no sentido da acessibilidade e simplicidade de operação.

9.1 Sugestões para trabalhos futuros

Este projeto abre amplas oportunidades para trabalhos futuros, podendo ser voltados na área de comando em controle, com a integração de softwares diferentes e avaliando o desempenho do manipulador; na área estrutural, adicionando mais um movimento rotativo ao robô resultando na inserção de um sexto grau de liberdade. Na área da mecânica também, é recomendado a reavaliação de alguns elementos de máquinas utilizados, como rolamentos, que afetam diretamente o movimento do robô. Também podem ser realizados novos testes metrológicos, para obtenção de resultados mais confiáveis, maior amostragem de medidas e com tratamentos estatísticos.

Referências

4-Axis DIY Wooden Robotic Arm Kit. Disponível em:

<<https://www.robotshop.com/en/4-axis-diy-wooden-robotic-arm-kit.html>>. Acesso em: 17 jun. 2018.

ABB IRB 140. Disponível em: <<https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-140/irb-140-data>>. Acesso em 25 de junho de 2018

AHRENS, C. H.; VOLPATO, N. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações.** São Paulo: Edgard Blücher, 2007. OCLC: 817120454. ISBN 978-85-212-0388-9.

AIRWOLF 3D. **PET film application to 3D Printer Glass.** Airwolf 3D. Disponível em: <<https://airwolf3d.com/2013/02/07/pet-film-application-to-3d-printer-glass/>>. Acesso em: 17 jun. 2018. p. 1. il. color.

ANDERSON, Chris. **Makers:** The New Industrial Revolution. [S.l.]: Crown Business, 2012. 272 p.

ANGEL, L. M. **THOR:** 3d printed robot arm. Disponível em: <<https://github.com/AngelLM/Thor>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

BCN3D MOVEO - A fully OpenSource 3D printed Robot Arm. Cults. Disponível em: <<https://cults3d.com/en/3d-model/tool/bcn3d-moveo-a-fully-opensource-3d-printed-robot-arm>>. Acesso em: 15 jun. 2018. p. 1

BCN3D Technologies. **MOVEO.** Disponível em: <<https://github.com/BCN3D/BCN3D-Moveo>>. Acesso em: 28 fev. 2018.

CARPES JR., Widomar P. **Introdução ao Projeto de Produtos.** 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 217 p.

CRAFTWARE. Disponível em <https://craftbotusa.com/craftware/?gclid=Cj0KCQjwnNvaBRCmARIsAOfZq-3YB8DWTVCiBQSDF3o1QIlnXr5eQVysfMFsU-B0h294rfgHCH-ef8UaAuzaEALw_wcB> Acesso em: 18 jun. 2018. p 1.

DOBOT Magician Overview – DOBOT. Disponível em: <<https://www.dobot.cc/dobot-magician/product-overview.html>>. Acesso em: 18 jun. 2018. p. 1

FlowArm PLTW (Download). Disponível em:

<<https://www.robotshop.com/en/flowarm-pltw.html>>. Acesso em: 17 jun. 2018.

GEBHARDT, Andreas ; HÖTTER, Jan-Steffen. **Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing.** München: Hanser Publishers, 2016. 591 p.

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia Mecatrônica.** Florianópolis, 2018

JOSHC. **Best 3D Printer Extruder in 2018.** 3DPrinterPrices.net. Disponível em:

<<http://www.3dprinterprices.net/best-3d-printer-extruder/>>. Acesso em: 17 jun. 2018. il. color.

LYNCH, Kevin M.; PARK, Frank C. **Modern Robotics: Mechanics, Planning and Control.** 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 544 p.

Lynxmotion AL5D PLTW Robotic Arm Kit. Disponível em:

<<https://www.robotshop.com/en/lynxmotion-al5d-pltw-robotic-arm-kit.html>>.

Acesso em: 17 jun. 2018.

MatterControl. Disponível em:

<<https://www.matterhackers.com/store//mattercontrol/sk/MKZGTDW6>> Acesso em: 18 jun. 2018. p. 1

Open Source, Connected Robot Arm. Hackster.io. Disponível em:

<<https://www.hackster.io/33936/open-source-connected-robot-arm-044286>>. Acesso em: 18 jun. 2018. p. 1

PREEZ, Rudy Du. **3D 6-DOF Serial Arm Robot: Kinematics and Implementation in LinuxCNC.** [S.l.: s.n.], 2014. 1 p. Disponível em:

<[http://alvarestech.com/temp/RoboAsealRB6S2-](http://alvarestech.com/temp/RoboAsealRB6S2-Fiat/CinematicaExemplosManuaisConfigurador-DH-EMC/EMC-6-axis-serial-robot-2.pdf)

[Fiat/CinematicaExemplosManuaisConfigurador-DH-EMC/EMC-6-axis-serial-robot-2.pdf](http://alvarestech.com/temp/RoboAsealRB6S2-Fiat/CinematicaExemplosManuaisConfigurador-DH-EMC/EMC-6-axis-serial-robot-2.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2018.

RIBEIRO, Luis Roberto; RIBEIRO, Camargo. **APRENDIZAGEM BASEADA EM PROBLEMAS (PBL) NA EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA.** [S.l.]: Research Gate, 2016. 11 p. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/268183847_APRENDIZAGEM_BASEADA_EM_PROBLEMAS_PBL_NA_EDUCACAO_EM_ENGENHARIA>. Acesso em: 28 fev. 2018.

Robotics Industries Association. **Association for Advancing Automation Reports Record Setting Growth for North American Robotics Market**. disponível em: <https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/Association-for-Advancing-Automation-Reports-Record-Setting-Growth-for-North-American-Robotics-Market/content_id/6899>, acesso em: 17 jun. 2018.

ROMANO, Vitor Ferreira. **Robótica Industrial**: Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos. 1. ed. [S.l.]: Edgard Blücher, 2002. 280 p.

ROMER Absolute Arm with integrated scanner, Hexagon Manufacturing Intelligence, disponível em: <<http://www.hexagonmi.com/products/portable-measuring-arms/romer-absolute-arm-with-integrated-scanner>>, acesso em: 13 jun. 2018, p. 1. il. color.

ROS.org | Core Components. Disponível em: <<http://www.ros.org/core-components/>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

Rostock MAX V2 Reviews & Ratings. 3D Hubs. Disponível em: <<https://www.3dhubs.com/3d-printers/rostock-max-v2>>. Acesso em: 18 jun. 2018. p. 1 il. color.

SeeMeCNC Rostock MAX v2. Make: DIY Projects and Ideas for Makers. Disponível em: <<https://makezine.com/product-review/seemecnc-rostock-max-v2/>>. Acesso em: 22 jun. 2018. p. 1

SICILIANO, Bruno et al. **Robotics**: Modelling, Planning and Control. 1. ed. London: Springer-Verlag, 2009. 632 p.

Thor. Disponível em: <<https://hackaday.io/project/12989-thor>>. Acesso em: 18 jun. 2018. p. 1