



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

**ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM ROBÓTICA E AUTOMAÇÃO  
INDUSTRIAL**

**EDUARDO LEITE SIMÕES E SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DEDO ROBÓTICO PARA UMA  
PRÓTESE**

**Juiz de Fora**

**Julho de 2018**

**EDUARDO LEITE SIMÕES E SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DEDO ROBÓTICO PARA UMA PRÓTESE**

Monografia apresentada ao Programa de graduação em Engenharia Elétrica com Ênfase em Robótica e Automação Industrial, da Universidade Federal de Juiz de Fora, para a conclusão da disciplina Trabalho Final de Curso.

Orientador: Ana Sophia Cavalcanti Alves Vilas Boas

Co-Orientador: Elias Ramos Vilas Boas

**Juiz de Fora**

**Julho de 2018**

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Leite Simões e Silva, Eduardo.

Desenvolvimento de um dedo robótico / Eduardo Leite Simões e Silva. -- 2018.

106 p.

Orientadora: Ana Sophia Cavalcanti Alves Vilas Boas

Coorientador: Elias Ramos Vilas Boas

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2018.

1. Dedo robótico. 2. Mão robótica. 3. Prótese robótica. 4. Tecnologia assistiva. 5. Robótica. I. Cavalcanti Alves Vilas Boas, Ana Sophia, orient. II. Ramos Vilas Boas, Elias, coorient.

**EDUARDO LEITE SIMÕES E SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DEDO ROBÓTICO PARA UMA PRÓTESE**

Monografia apresentada ao Programa de graduação em Engenharia Elétrica com Ênfase em Robótica e Automação Industrial, da Universidade Federal de Juiz de Fora, para a conclusão da disciplina Trabalho Final de Curso.

Aprovada em 11 de Julho de 2018

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Ana Sophia Cavalcanti Alves Vilas Boas - Orientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Ms. Eng. Elias Ramos Vilas Boas - Co-Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr. Leonardo Rocha Olivi  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr. Exuperry Barros Costa  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## **Agradecimentos**

Primeiramente, eu gostaria de dedicar esse trabalho a minha irmã Mariana que sempre foi uma fonte de inspiração, aos meus pais Carmem e José Eduardo que sempre estiveram ao meu lado durante toda a minha vida, investindo em minha educação e me apoiando em todas as decisões, fossem elas racionais ou não, a minha avó Cassilda por todas as lembranças e ensinamentos aprendidos, e, também, a minha namorada e companheira Amanda que esteve ao meu lado durante os desafios finais desse trabalho. A família sempre é e será para mim a base para as maiores conquistas.

Agradeço a minha orientadora Ana Sophia e meu co-orientador Elias Ramos que auxiliaram em minha caminhada na universidade desde meu primeiro projeto até no desenvolvimento e na conclusão desse TCC. Não tenho como deixar de mencionar também todos os professores que, de alguma forma, ao longo de minha trajetória foram essenciais para a construção do meu saber educacional e de minha formação pessoal.

Finalmente, agradeço a todos os meus amigos que auxiliaram no desenvolvimento desse projeto por meio de observações, dicas, apoio ou correções.

*“You, the people, have the power, the power to create machines, the power to create happiness! You, the people, have the power to make this life free and beautiful, to make this life a wonderful adventure.”*

Charles Spencer Chaplin

## RESUMO

A pequena gama de mãos robóticas fabricadas com o intuito de serem utilizadas como próteses, assim como o elevado preço dessas mãos, estimularam o desenvolvimento de um dedo robótico de menor custo. Foram estudadas próteses já existentes e trabalhos do ramo para que fosse possível otimizar e validar o dedo robótico em desenvolvimento. Dessa maneira, consegue-se diminuir o preço de um dedo robótico, e, conseqüentemente, o valor total pago a uma prótese robótica de uma mão. Espera-se que este projeto proporcione a um maior número de pessoas com deficiência os benefícios, tanto funcionais quanto sociais, dessa tecnologia assistiva.

**Palavras-chave:** dedo robótico, mão robótica, prótese robótica.

## **ABSTRACT**

The few options of robotic hands constructed to be human prosthesis, as well as the high cost of these hands, stimulated the development of a low cost robotic finger. Analysing the available prostheses along with other works in this branch helped to optimize and validate the concept of the finger. Therefore, it was possible to reduce the cost of the robotic finger, which will affect directly in the final cost of the prosthetic hand. This project will provide more accessibility to this kind of technology, benefiting the people that really need a prosthesis.

**Key words:** robotic finger, robotic hand, robotic prosthesis.



## LISTA DE IMAGENS

Figura 1 – Mão robótica <i>Schunk</i> _____	18
Figura 2 – Projeto <i>InMoov</i> _____	19
Figura 3 – Mão robótica <i>BeBionic</i> _____	22
Figura 4 – Posição <i>Tripod</i> [6] _____	23
Figura 5 – Mão robótica <i>I-Limb</i> [8] _____	24
Figura 6 – Paul Ventimiglia Project [9] _____	26
Figura 7 – Mecanismo de movimentação de Paul Ventimiglia Project [9] _____	27
Figura 8 – Estrutura óssea da mão humana [10] _____	28
Figura 9 - 250:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 12V _____	30
Figura 10 – Disposição dos eixos existentes no componente (Adaptado de [11]) _____	32
Figura 11 - Dimensões do motor com escovas de carbono (HPCB) [11] _____	34
Figura 12 – Mão Humana com os motores alocados em seu lugar de utilização _____	34
Figura 13 – Encoder Magnético [11] _____	35
Figura 14 – Montagem do <i>encoder</i> no micromotor <i>Pololu</i> [11] _____	36
Figura 15 – Pinagem do encoder [11] _____	36
Figura 16 - <i>TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier</i> [11] _____	37
Figura 17 – Pinagem do <i>driver TB6612FNG</i> [11] _____	39
Figura 18 – Arduino Mega 2560 [13] _____	41
Figura 19 – Zippy 11.1V 2200mah 30C _____	42
Figura 20 – Controle remoto e receptor [17] _____	44
Figura 21 – Chave fim de curso [18] _____	45
Figura 22 – <i>Push button</i> [19] _____	46
Figura 23 – Sensor de Pressão [22] _____	47
Figura 24 – Circuito indicado para o sensor de pressão [22] _____	48
Figura 25 – Primeiro esboço do mecanismo de movimento _____	49
Figura 26 – Desenho mais elaborado do mecanismo para base de <i>LEGO</i> _____	50
Figura 27 – Desenho base para o design mais real do dedo _____	50
Figura 28 – Dedo 1 desenvolvido em <i>LEGO</i> _____	51
Figura 29 – Dedo 2 desenvolvido em <i>LEGO</i> _____	51
Figura 30 – Dedo 3 desenvolvido em <i>LEGO</i> _____	52
Figura 31 – Visão lateral mais humana do Modelo 1 _____	53

Figura 32 – Visão lateral do mecanismo do Modelo 1	53
Figura 33 – Vista lateral do Modelo 2	54
Figura 34 – Vista em 3D do Modelo 2	54
Figura 35 – Eixo de movimento com tamanho de 9 mm	55
Figura 36 – ângulo de trabalho da coroa	56
Figura 37 – Dados do projeto Coroa e Rosca sem-fim [24]	60
Figura 38 – Coroa	69
Figura 39 – Rosca sem-fim	69
Figura 40 – Vista lateral e superior da montagem Coroa e Rosca sem-fim	69
Figura 41 – Montagem final do dedo robótico	70
Figura 42 – Vista 3D do dedo em explosão	71
Figura 43 – Falange distal e média	71
Figura 44 – Falange Proximal	72
Figura 45 – Barras de movimentação e fixação	72
Figura 46 – Base da palma da mão	73
Figura 47 – Tampa protetora	73
Figura 48 – Conjunto coroa, sem-fim e motor	74
Figura 49 – Ângulo de trabalho da coroa após desenho final	74
Figura 50 – Forças no conjunto coroa e rosca sem-fim (abertura da mão)	75
Figura 51 – Diagrama de forças no conjunto coroa e rosca sem-fim simplificado	75
Figura 52 – Diagrama de forças	79
Figura 53 – Valores de distância das forças relevantes	79
Figura 54 – Gráfico de ensaio de tração da empresa 3DLab [31]	84
Figura 55 – Conexão dos componentes	85
Figura 56 – Diagrama de funcionamento do dedo robótico	86
Figura 57 – Movimentação do dedo de acordo com a angulação da coroa	88
Figura 58 – Sistema de controle em malha aberta (Adaptado de [33])	89
Figura 59 – Sistema de controle em malha fechada (Adaptado de [33])	89
Figura 60 – Funcionamento da programação do sistema	91
Figura 61 – Alocação dos microcontroladores na palma da mão	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes da InMoov [5] _____	20
Tabela 2 – Comparação entre os motores do mercado _____	31
Tabela 3 – Comparação de motores Pololu disponíveis [11] _____	31
Tabela 4 – <i>Drivers</i> disponíveis para o micromotor do projeto (Adaptado de [11]) __	38
Tabela 5 - Tabela de comando do <i>driver-micromotor</i> (Traduzido de [12]) _____	40
Tabela 6 – Comparação de motores Pololu disponíveis _____	55
Tabela 7- Número de dentes na coroa para 10 RPM _____	58
Tabela 8 – Dados definidos da Coroa _____	60
Tabela 9 – Dados definidos da Rosca sem-fim _____	60
Tabela 10 – Dados do conjunto Coroa e Rosca sem-fim _____	67
Tabela 11 – Dados de forças no dedo _____	81
Tabela 12 – Força do dedo humano (Adaptado de [28]) _____	81
Tabela 13 – Custo de fabricação de um dedo robótico _____	97
Tabela 14 – Custo de fabricação para uma mão com cinco dedos robóticos _____	97

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
<b>1.1. TECNOLOGIAS ASSISTIVAS .....</b>	<b>15</b>
1.1.1. RECURSOS .....	16
1.1.2. SERVIÇOS .....	16
<b>1.2. A ROBÓTICA E SUAS APLICAÇÕES .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3. OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
2. PESQUISA E DEFINIÇÕES.....	18
<b>2.1. INSPIRAÇÕES.....</b>	<b>18</b>
2.1.1. SCHUNK & KUKA ROBOTICS .....	18
2.1.2. <i>INMOOV</i> .....	19
2.1.3. PRÓTESES ROBÓTICAS DISPONÍVEIS NO MERCADO .....	20
2.1.3.1. BeBionic.....	21
2.1.3.2. I-Limb.....	23
2.1.4. PAUL VENTIMIGLIA PROJECT.....	25
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	27
<b>3.1. ANATOMIA DA MÃO HUMANA .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2. CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS AO PROJETO .....</b>	<b>28</b>
3.2.1. DESIGN HUMANO .....	28
3.2.2. ACIONAMENTO POR MEIO DE MOTORES CC .....	29
3.2.3. UTILIZAÇÃO DE ENGRENAGENS E EIXOS RÍGIDOS .....	29
<b>3.3. COMPONENTES ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS.....</b>	<b>30</b>
3.3.1. MICROMOTOR .....	30
3.3.1.1. Descrição geral do componente .....	30
3.3.1.2. Escolha do componente.....	31
3.3.1.3. Características Gerais.....	32
3.3.2. <i>ENCODER</i> .....	35
3.3.2.1. Descrição geral do componente .....	35
3.3.2.2. Escolha do componente.....	35
3.3.2.3. Características Gerais.....	35

3.3.3. DRIVER .....	37
3.3.3.1. Descrição geral do componente .....	37
3.3.3.2. Escolha do componente.....	37
3.3.3.3. Características Gerais.....	38
3.3.4. ARDUINO MEGA 2560 .....	40
3.3.4.1. Descrição geral do componente .....	40
3.3.4.2. Escolha do componente.....	41
3.3.4.3. Características Gerais.....	41
3.3.5. BATERIA.....	42
3.3.5.1. Descrição geral do componente .....	42
3.3.5.2. Escolha do componente.....	43
3.3.5.3. Características Gerais.....	44
3.3.6. CONTROLE REMOTO.....	44
3.3.6.1. Descrição geral do componente .....	44
3.3.6.2. Características Gerais.....	44
3.3.7. FIM DE CURSO .....	45
3.3.7.1. Descrição geral do componente .....	45
3.3.7.2. Escolha do componente.....	46
3.3.7.3. Características Gerais.....	46
3.3.8. SENSOR DE PRESSÃO.....	47
3.3.8.1. Descrição geral do componente .....	47
3.3.8.2. Características Gerais.....	47
<b>3.4. CRIAÇÃO DO DEDO ROBÓTICO .....</b>	<b>48</b>
3.4.1. DESENHOS.....	48
3.4.2. LEGO .....	51
3.4.3. DESIGN VIRTUAL – <i>SOLIDWORKS</i> .....	52
3.4.3.1. Modelo 3D - 1.....	52
3.4.3.2. Modelo 3D – 2.....	53
3.4.4. COROA E ROSCA SEM-FIM .....	54
3.4.4.1. Cálculos de dimensões do conjunto Coroa e Rosca sem-fim.....	59
3.4.4.1.1. Rosca sem-fim .....	61
3.4.4.1.2. Coroa .....	63
3.4.4.1.3. Dados Complementares.....	64
3.4.4.2. Desenho .....	68
3.4.5. DESIGN FINAL DO DEDO .....	69

3.4.5.1. Montagem Final .....	70
3.4.5.2. Falange distal e média.....	71
3.4.5.3. Falange Proximal .....	71
3.4.5.4. Barras de movimentação e fixação .....	72
3.4.5.5. Base de fixação para a palma da mão e tampa protetora .....	72
3.4.5.6. Conjunto Coroa, Sem-fim e Motor.....	73
3.4.5.7. Ângulo de trabalho da rosca .....	74
3.4.6. CÁLCULOS DE FORÇAS DO DEDO ROBÓTICO .....	74
3.4.6.1. Comparação a um dedo humano.....	81
3.4.7. MATERIAIS .....	82
3.4.7.1. PLA.....	83
3.4.7.1.1. Composição.....	83
3.4.7.1.2. Características Mecânicas.....	83
<b>3.5. CONEXÃO DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS.....</b>	<b>85</b>
<b>3.6. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.....</b>	<b>86</b>
<b>3.7. CONTROLE .....</b>	<b>87</b>
3.7.1. DEFINIÇÃO DE MALHA FECHADA .....	89
3.7.2. FUNCIONAMENTO DO CONTROLE.....	89
3.7.3. RELAÇÃO <i>ENCODER</i> – ANGULAÇÃO DA COROA .....	90
<b>3.8. PROGRAMAÇÃO .....</b>	<b>91</b>
<b>4. DISCUSSÃO.....</b>	<b>94</b>
<b>4.1. DEFINIÇÕES.....</b>	<b>94</b>
<b>4.2. CUSTO .....</b>	<b>96</b>
<b>4.3. FORÇA E OUTROS FATORES.....</b>	<b>98</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>99</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>101</b>
<b>7. APÊNDICE.....</b>	<b>104</b>
A. PSEUDOCÓDIGO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.....	104

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. TECNOLOGIAS ASSISTIVAS

As tecnologias assistivas podem ser definidas como tecnologias que contribuem, auxiliam ou ampliam as habilidades funcionais de pessoas com deficiência como por exemplo a comunicação, a mobilidade, entre outras. Em outras palavras, são tecnologias que promovem uma vida mais independente, com maior qualidade, oferecendo como resultado, uma maior inclusão social [1][2].

Outra definição deste tipo de tecnologia é dada por Cook e Hussey (1995) “Uma ampla gama de equipamentos, serviços, estratégias e práticas concebidas e aplicadas para minorar os problemas encontrados pelos indivíduos com deficiências”[3].

No Brasil o conceito de tecnologia assistiva é descrito segundo o Comitê de Ajudas Técnicas (CAT), instituído pela PORTARIA Nº 142, de 16 de Novembro de 2006 da seguinte forma:

“Tecnologia Assistiva é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social" (*ATA VII - Comitê de Ajudas Técnicas (CAT) - Coordenadoria Nacional para Integração da Pessoa Portadora de Deficiência (CORDE) - Secretaria Especial dos Direitos Humanos - Presidência da República*) [2].

As tecnologias assistivas podem ser basicamente divididas em dois ramos: Recursos e Serviços.

### **1.1.1. Recursos**

São denominados recursos qualquer item, equipamento ou parte dele, sistema ou produto que é fabricado ou em série ou sob medida para seu utilizador que promova o aumento, mantenha ou melhore as capacidades funcionais de pessoas com deficiência.

Logo, recursos variam desde uma simples bengala, até uma prótese robótica que capta os impulsos nervosos do utilizador para que realize os movimentos requeridos. Estão inclusos nesse segmento: brinquedos e roupas adaptadas, computadores, softwares e hardwares especiais que contemplem questões de acessibilidade, auxílios visuais como óculos ou lentes, próteses para mobilidade tanto com acionamento manual ou automático, e mais uma infinidade de itens [1].

### **1.1.2. Serviços**

Em relação aos serviços, estes são definidos como tudo aquilo que auxilia uma pessoa a selecionar, comprar ou usar os recursos ditos anteriormente. Ou seja, são aqueles serviços prestados profissionalmente à pessoa com deficiência, que visa ajudá-la a escolher o melhor equipamento de acordo com sua deficiência.

Os serviços de tecnologia assistiva podem ser prestados por uma grande variedade de profissionais, dos quais se destacam fisioterapeutas, psicólogos, terapeutas ocupacionais, médicos, engenheiros, arquitetos, enfermeiros e muitos outros que cumpram esse papel [1][2].

## **1.2. A ROBÓTICA E SUAS APLICAÇÕES**

A robótica é definida como uma área multidisciplinar que inclui características de várias engenharias, como a mecânica e a elétrica e também de outras áreas como a ciência da computação. A robótica compreende todo o desenvolvimento de robôs desde seu design até sua construção e operação. Tais



robôs variam desde veículos, manipuladores robóticos, até mesmo sistemas industriais robóticos automatizados.

Todos esses robôs têm como sua principal função a realização de um serviço específico pré-definido, de forma que alguns desses robôs realizam sua tarefa de forma autônoma, enquanto outros necessitam de um encarregado que auxilia-os em sua operação.

Por conta da variedade de tecnologias englobadas pela robótica, é possível o desenvolvimento de robôs que consigam reproduzir as ações realizadas pelos seres humanos no dia-a-dia. Desse modo é possível que os robôs sejam empregados em uma linha de montagem em uma indústria, assim como também podem ser utilizados para a realização de ações em ambientes pouco propícios ao ser humano.

Neste trabalho, entretanto, a robótica será empregada para o desenvolvimento de uma tecnologia assistiva que se enquadra na definição de Recurso citada anteriormente, já que a tecnologia aqui desenvolvida tem o intuito de substituir um membro perdido.

### 1.3. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é a utilização da robótica para a criação de um dedo robótico de baixo custo (inicialmente o dedo a ser desenvolvido será o indicador), visando em trabalhos futuros o seu emprego na construção de uma prótese robótica de uma mão humana. A mão robótica, assim como o dedo desenvolvido, terá como seu principal objetivo a substituição de um membro perdido, trazendo de volta as funcionalidades de uma mão/dedo humano à pessoa portadora de deficiência. Secundariamente, o trabalho desenvolvido servirá também de objeto de estudo e para pesquisas na área.

O objetivo foi definido após a realização de algumas pesquisas a respeito de próteses robóticas de mãos humanas, em que chegou-se à conclusão de que as próteses disponíveis no mercado não são acessíveis à grande parte da população devido, principalmente, ao seu alto custo que pode variar de 25 mil até 120 mil

dólares. Desse modo, viu-se com bons olhos a abordagem do assunto, e a necessidade de fazer algo que pudesse de alguma forma beneficiar pessoas deficientes e indiretamente a sociedade como um todo.

## **2. PESQUISA E DEFINIÇÕES**

Nos seguintes tópicos serão apresentadas as pesquisas realizadas na área, e as conclusões tomadas a respeito das características de cada mão robótica, assistiva ou não, que servirão para o desenvolvimento do projeto.

### **2.1. INSPIRAÇÕES**

#### **2.1.1. Schunk & KUKA Robotics**

A primeira mão robótica estudada e que auxiliou na construção desse trabalho foi desenvolvida pela empresa *Schunk*, Figura 1. Ela ficou famosa e fez muito sucesso em parceria com a empresa *KUKA Robotics*, quando foram elaborados dois comerciais em que essa mão jogava tênis de mesa contra um campeão mundial, e também tocava músicas utilizando copos com água [4].

Essa mão foi a primeira mão robótica utilizada para fins industriais pelo fato de ser muito precisa em seus movimentos por conta de utilizar motores diretamente conectados aos dedos por mecanismos rígidos [4].

Note-se que, embora o projeto desse mecanismo se configure como segredo industrial, é possível, por meio de fotos e vídeos, inferir sobre algumas das características citadas anteriormente

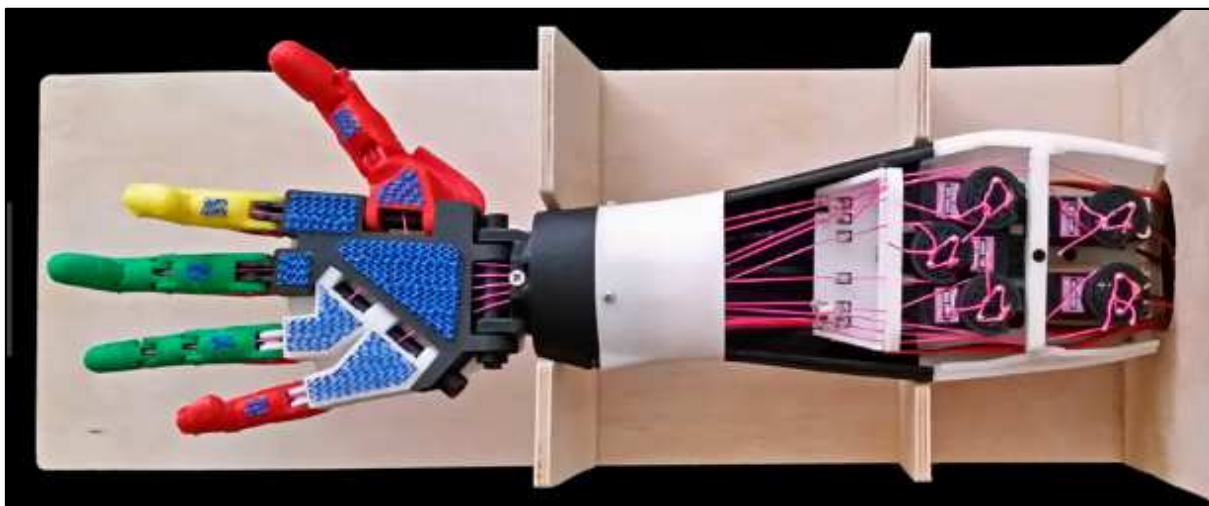
Figura 1 – Mão robótica *Schunk*



### 2.1.2. *InMoov*

A segunda inspiração para o design do dedo foi o projeto *InMoov*, Figura 2, que é um projeto com código, desenhos e design disponíveis na internet.

Figura 2 – Projeto *InMoov*



Na UFJF, a Profa. Dra. Ana Sophia e o Ms. Elias Ramos fabricaram a mão e o antebraço desse projeto utilizando uma impressora 3D, sendo assim possível analisá-la, estudar seu funcionamento e todo o seu projeto. Desse modo, foi possível destacar seus componentes, Tabela 1, e também estabelecer ideias importantes para o desenvolvimento do dedo/mão robótica [5].

Tabela 1 – Componentes da InMoov [5]

InMoov		
Componente	Especificação	Quantidade
PLA	-	2 Kg
Cabos de Nylon	-	2 metros
Servo Motor	MG946R	6
Arduino	UNO	1
Fonte de Computador	-	1
Parafusos e eixos	-	-

Algumas observações podem ser feitas:

1 – Os servos motores que fazem a movimentação do dedo tiveram que ser deslocados para o antebraço pois são muito grandes e pesados;

2 – O movimento dos dedos é feito via cabo, que fecham a mão ao serem puxados pelos servos motores, e a abrem, quando soltos. Por conta desse mecanismo, quando os cabos não estão completamente tracionados, pode ocorrer uma falha em sua movimentação causando uma perda de precisão, que é contornada com a utilização de tensionadores localizados no pulso da mão. No entanto, nem sempre essa medida de correção funciona, o que causa uma variação na precisão de funcionamento do sistema.

3 – Outra observação sobre a utilização de cabos é que, à medida que o tempo passa e o sistema é utilizado, os cabos vão se degradando. Logo, os cabos necessitam de substituição, porém tal manutenção não é simples, sendo necessário o desmonte de toda a mão.

Uma observação relevante sobre o *InMoov* é que se trata de um projeto de um robô humanoide em tamanho real, não tendo como principal propósito a sua utilização como prótese, contudo, suas características são importantes para o desenvolvimento do trabalho por propiciar uma visão diferente [5].

### 2.1.3. Próteses robóticas disponíveis no mercado

Após os primeiros contatos diretos com uma mão robótica, os quais possibilitaram um estudo mais específico dos mecanismos de controle, de

fabricação e construção de uma mão robótica, outras mãos robóticas foram estudadas, desta vez, com o foco na real substituição de um membro amputado.

A *I-limb* e a *BeBionic* foram as duas mão robóticas escolhidas para um estudo mais detalhado. Essa escolha se deu por conta que ambas se destacam entre as melhores do mercado ao se levar em consideração os seguinte critérios.

- **Eficiência de trabalho** → Como os usuários finais avaliaram sua *performance*, isto é, se é útil para todas as atividades e consegue exercer as operações básicas de uma mão como pinçar, agarrar, pressionar, apertar;
- **Semelhança física** → Se a mão tem um design convidativo para o usuário com um tamanho correto para a execução das tarefas necessárias;
- **Características mecânicas** → Se ela é muito pesada, se sua bateria consegue suportar seu funcionamento durante um dia completo, se seu mecanismo de movimentação consegue funcionar corretamente;
- **Facilidade de comando por meio do usuário** → Se a prótese é fácil de ser operada, se tem controles intuitivos, se é necessária uma segunda mão para seu controle e se pode ser acionada de outras formas;
- **Segurança** → Se ela tem firmeza para segurar objetos, e ao mesmo tempo a delicadeza para evitar a quebra e/ou acidentes com esses objetos.

O estudo dessas mãos foi realizado com a utilização de vídeos e fotos disponíveis na internet, trabalhos realizados com base em seus projetos e dados coletados em seus respectivos websites (como detalhes técnicos, peso, comando e manutenção).

#### 2.1.3.1. *BeBionic*

A mão robótica *BeBionic* mostrada na Figura 3 é conhecida pelo seu alto grau de sofisticação, no que se refere a próteses robóticas. Utilizando como base os critérios citados em 2.1.3, podem ser observadas uma série de características interessantes [6].

Figura 3 – Mão robótica *BeBionic*

- **Eficiência de trabalho:** Segundo informações evidenciadas no manual de instrução, ela é capaz de fornecer até 14 posições diferentes de utilização. Entrevistas de usuários que utilizam a *BeBionic* mostram que a prótese consegue exercer todas as tarefas de uma mão humana, podendo fazer tarefas delicadas, acionar botões, carregar peso e objetos. Dessa forma, ela se mostra eficiente nas tarefas do dia-a-dia.
- **Semelhança física:** A *BeBionic* possui 3 diferentes tamanhos, e pode se adaptar a diferentes pessoas com diversas estaturas. Além disso, ela possui uma pele artificial com uma vasta lista de tonalidades de cores, para se assemelhar a uma mão humana.
- **Características mecânicas:** De acordo com seus desenvolvedores, a *BeBionic* é projetada para que sua bateria dure todo o dia, caso o utilizador realize atividades cotidianas comuns. O dedo dessa mão exerce uma força de no máximo 36.6 N na posição *Tripod*, mostrada na Figura 4, e o peso da mão varia entre 390 gramas e 598 gramas, de acordo com o tamanho escolhido da mão.

Figura 4 – Posição *Tripod* [6]

- **Facilidade de comando por meio do usuário:** A *BeBionic* utiliza sensores que captam as contrações musculares para ativar seus movimentos. Porém, para alguns casos, é necessário que o utilizador mova manualmente o dedo polegar para a realização do movimento requerido.
- **Segurança:** Existem sensores que identificam caso a mão esteja sendo utilizada para agarrar/segurar algum objeto, não deixando que o objeto seja esmagado ou se solte antes que o usuário faça o comando.
- **Custo:** Apenas a mão, custa em torno de 9.000 dólares. O pulso, dependendo de qual tipo é escolhido, varia entre 2.500 a 3.000 dólares. Já o restante do antebraço, que fixa a mão ao corpo do utilizador, aloca as baterias, e os eletrodos que captam a atividade muscular, custa de 4.000 a 5.000 dólares. Os eletrodos e as baterias devem ser adquiridas separadamente. Em média, todo o equipamento que constitui a prótese varia entre 25.000 e 35.000 dólares [7].

As informações de preços foram retiradas da internet de usuários que já adquiriram o equipamento e de sites especializados em próteses, isso porque a empresa que produz a *BeBionic* não fornece o preço caso o comprador não tenha interesse real de adquirir o produto.

#### 2.1.3.2. *I-Limb*

A *I-Limb*, Figura 5, é outra prótese robótica que pode ser adquirida no mercado. Embora não tão conhecida como a *BeBionic*, ela é com certeza uma

prótese que contém características superiores que a anterior. Abaixo estão dispostas as observações e dados técnicos adquiridos da *I-Limb* [8].

Figura 5 – Mão robótica *I-Limb* [8]



- **Eficiência de trabalho:** Segundo suas informações técnicas a *I-Limb* oferece ao usuário 24 movimentos diferentes pré-definidos, podendo somar mais 12 movimentações personalizadas pelo usuário.

Em entrevistas e comentários de usuários que utilizam a *I-Limb*, é possível salientar que a prótese consegue exercer todas as funções de uma mão humana.

- **Semelhança física:** A *I-Limb* possui 4 diferentes tamanhos que se adaptam a pessoas de diferentes estaturas. Além disso ela possui uma pele artificial com 18 opções de tons de pele para diferentes usuários.

- **Características mecânicas:** Segundo seus desenvolvedores, a *I-Limb* é projetada de forma que sua bateria forneça energia por todo o dia, caso o utilizador realize atividades cotidianas comuns. O peso da mão varia entre 432 gramas e 628 gramas dependendo de qual for o tamanho escolhido. Não foram encontrados dados sobre a força que cada dedo exerce.



- **Facilidade de comando por meio do usuário:** A *I-Limb* utiliza sensores que captam as contrações musculares e assim realizam o movimento da mão. Ao contrário da *BeBionic*, a *I-Limb* possui um movimento automatizado do polegar. Dessa forma, não é necessária nenhuma operação manual por parte do usuário.

- **Segurança:** Um fator diferencial dessa prótese é a possibilidade de uma rápida alteração dos movimentos realizados pela mão, utilizando para isso um simples aplicativo de smartphone. Essa função é utilizada quando há a necessidade de um movimento não antes programado.

Assim como na *BeBionic*, existem sensores que identificam caso a mão esteja sendo utilizada para agarrar/segurar algum objeto, não deixando que o objeto seja esmagado ou se solte antes que o usuário realize tal comando. Porém, o que diferencia a *I-Limb* é que também existe a possibilidade de utilizar pequenos chips que, via *bluetooth*, se comunicam com a mão informando qual pegada/movimentação deve ser realizada naquele local em que o chip se encontra. Por isso, esses chips devem ser instalados, por exemplo, perto do teclado do computador, e assim quando a mão se aproxima, ela irá se programar para fazer a movimentação de digitação.

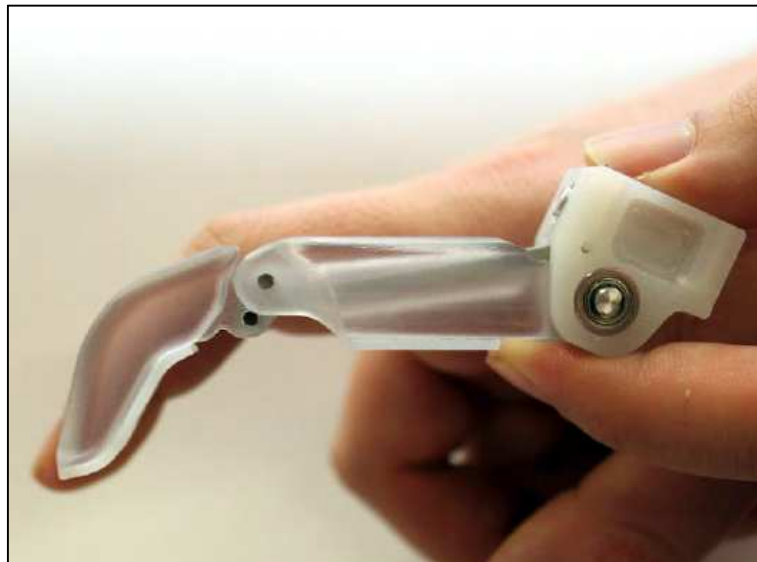
- **Custo:** O conjunto completo da *I-Limb* custa de 80.000 até 120.000 dólares [7]. As informações de preços foram retiradas da internet de usuários que já adquiriram o equipamento e de sites especializados em próteses, isso porque a empresa que produz a *I-Limb* não fornece o preço caso o comprador não tenha interesse real na aquisição do produto.

#### 2.1.4. Paul Ventimiglia Project

O trabalho “*Design of a Human Hand Prosthesis*” desenvolvido por Paul Ventimiglia, Figura 6, teve muitas de suas características e sua forma de desenvolver o projeto levadas em consideração para a estruturação do trabalho aqui apresentado. Ventimiglia, foi um dos poucos trabalhos em que foi possível a análise por completo de todo o desenvolvimento do dedo, desde as ideias conceituais, até a finalização do projeto. Por conta disso, as especificações e estudos de Ventimiglia

foram de vital importância para conceituação, desenvolvimento e criação do dedo robótico em questão [9].

Figura 6 – Paul Ventimiglia Project [9]

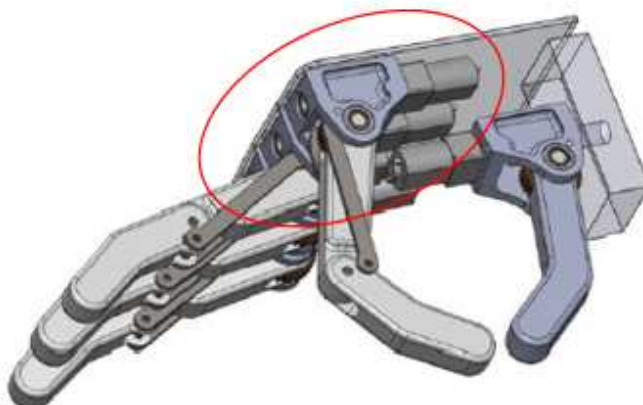


Um dos pontos que pode ser destacado é o mecanismo de movimentação do dedo. O mecanismo possui um alto grau de sofisticação, e foi bem desenvolvido e executado pelo autor, assim como os aspectos visuais e estéticos que em sua maioria foram projetados para se parecerem com a estrutura de uma mão/dedo humano.

Outro ponto que chamou atenção no projeto de Ventimiglia foi a utilização de motores CC ao invés de motores de passo ou servos motores. A utilização do motor CC trouxe a necessidade de um potenciômetro para a identificação do posicionamento do dedo, porém, com a utilização de motores CC pôde-se resguardar para a alocação da bateria e dos componentes eletrônicos, um grande espaço na palma da mão. Além disso, a utilização de engrenagens ao invés de cabos para a movimentação do dedo, traz mais precisão, controle e durabilidade aos mecanismos, sendo outro ponto positivo a ser observado.

Existem, também, alguns tópicos que segundo algumas observações, podem ser otimizados. Como o grande volume criado ao alocar o mecanismo de movimentação do dedo acima das falanges, e não abaixo, Figura 7. Esse volume anormal para uma mão humana causa uma estética não muito agradável aos olhos.

Figura 7 – Mecanismo de movimentação de Paul Ventimiglia Project [9]



A utilização de sensores de corrente para controlar a força dos dedos é outro tópico. Ventimiglia supõe que caso ocorra uma alta corrente, o dedo está exercendo uma força elevada, o que significa que o dedo encontrou um obstáculo (objeto) pelo caminho. Contudo, em determinados casos, a corrente pode ser elevada mesmo que o dedo não esteja exercendo força em um objeto. Um exemplo disso é quando o motor é acionado do repouso. Por conta desses casos particulares, é possível que ocorra uma perda de precisão por parte do controle.

### 3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Com os estudos e dados levantados pela comparação das mãos robóticas pré-existentes, foram definidas as principais características para que um dedo/mão seja eficiente tanto no aspecto mecânico, quanto no físico, e como essas características serão empregadas neste trabalho, sem deixar de levar em consideração a anatomia da mão humana.

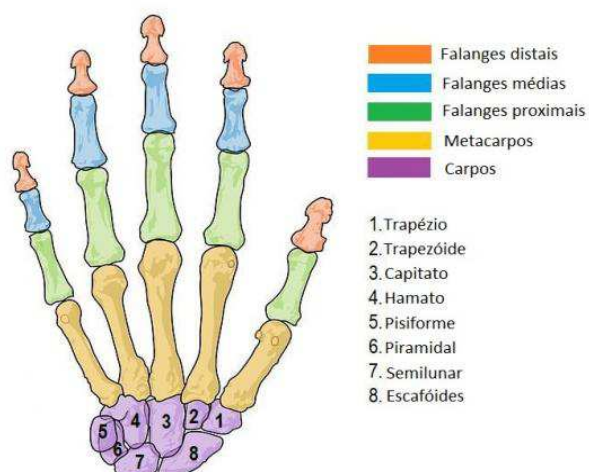
Também será descrito todo o desenvolvimento do dedo, desde seus desenhos iniciais até os finais, seus componentes, materiais empregados, as forças exercidas, seu funcionamento e controle.

### 3.1. ANATOMIA DA MÃO HUMANA

É necessário ter o conhecimento de como os ossos da mão humana são dispostos, pois, dessa forma, pode-se reproduzir mais fielmente a movimentação dos dedos e sua estrutura.

Na Figura 8, é possível notar quais partes do dedo humano que se flexionam quando ocorre a movimentação dos dedos. Pode-se notar que o movimento ocorre basicamente entre as falanges distais e as falanges médias, entre as falanges médias e as falanges proximais, e entre as falanges proximais e os metacarpos, locais esses denominados como articulações.

Figura 8 – Estrutura óssea da mão humana [10]



Portanto, neste trabalho os ossos que deverão ser tomados como base para a construção do dedo são as falanges distais, médias e proximais.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS AO PROJETO

#### 3.2.1. Design Humano

Deseja-se um design mais humano do dedo e da mão, com dimensões, peso e formato que estejam dentro da média para uma mão de um humano adulto, com o acréscimo de que é preferível que todos os componentes caibam na mão, sem a necessidade de expandir para o antebraço, para que dessa forma, uma pessoa que não possua somente mão, seja capaz de utilizar a prótese.

Outro fator que não se deve deixar de ser mencionado, é a movimentação do dedo, que deverá ser parecida com a de um dedo humano, para que assim possa exercer o máximo de funções possíveis.

Deve ser também possível um aumento das dimensões do dedo para que a prótese possa se adaptar a pessoas de diferentes estaturas.

Com essas características têm-se uma melhor adaptação do dedo ao usuário final, fornecendo algo no padrão de seu corpo - com dimensões próximas ao ideal, sem se diferenciar muito de um dedo humano.

### **3.2.2. Acionamento por meio de motores CC**

Optou-se pela utilização de micromotores CC no acionamento do mecanismo de movimento do dedo. Foi decidido assim, porque em comparação ao servo motor, o micromotor CC pode ser encontrado em dimensões bem pequenas, cabendo facilmente na palma da mão, não necessitando, conseqüentemente, de um aumento das dimensões.

Algo que contaria a favor do servo motor é a precisão mais elevada, no entanto, é possível - para o controle de posição do micromotor CC - o acoplamento de um encoder que dependendo da redução do motor, aumentará drasticamente a precisão final no eixo de saída do micromotor. Por conta disso, é necessário um motor que tenha uma redução mais elevada que os demais, ou seja, a cada giro completo em seu eixo de saída, o seu eixo do motor deve se rotacionar inúmeras vezes, com o objetivo de tornar a resolução da medida pequena o suficiente para fornecer uma grande precisão ao sistema.

### **3.2.3. Utilização de engrenagens e eixos rígidos**

Devido aos problemas relatados sobre o sistema de cabos do InMoov utilizados para a movimentação do dedo, foi decidido pela utilização de engrenagens e barras rígidas para a mecânica de movimentação do dedo. Desse modo, é esperada uma menor taxa de manutenção do equipamento, e um menor desgaste e falhas no movimento do dedo aumentando, assim, a precisão do sistema.

Outro ponto positivo é a realização da manutenção, que poderá ser feita mais facilmente, com a desmontagem e troca apenas da peça danificada, diminuindo também, os custos para esse trabalho. Caso fosse utilizado um cabeamento como no *InMoov*, seria necessária a desmontagem de todo o dedo para a passagem de um novo cabo que, por sua vez, exige sempre novos ajustes e calibrações dos componentes da mão robótica.

### 3.3. COMPONENTES ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS

Os próximos tópicos irão descrever quais são os componentes selecionados para a construção do projeto do dedo robótico.

É importante ressaltar que os componentes aqui descritos, devem ser reavaliados em caso de um futuro projeto de uma mão completa com cinco dedos, pois as necessidades de tensão, corrente, espaço disponível, entre outros aspectos poderão ser alterados.

#### 3.3.1. Micromotor

##### 3.3.1.1. *Descrição geral do componente*

O micromotor é um dos componentes fundamentais do projeto. Ele é responsável pela conversão de energia elétrica em energia mecânica, movimentando desse modo o dedo.

Figura 9 - 250:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 12V



### 3.3.1.2. Escolha do componente

Existem vários micromotores CC que poderiam ser utilizados neste trabalho, alguns deles podem ser visualizados na Tabela 2 [9].

Tabela 2 – Comparação entre os motores do mercado

Dados dos motores			
Nome	Redução	Tensão	Velocidade
B62	62:1	14,4 V	360 RPM
Pololu	250:1	12 V	120 RPM
Escap 16N78-212P	1:1	6 V	9300 RPM
SRV Drive	100:1	7,4 V	330 RPM
Dados adicionais			
Nome	Stall Torque	Peso	Preço (Dólares)
B62	1,55 Nm	70,02 gramas	30
Pololu	0,423 Nm	9,92 gramas	18.95
Escap 16N78-212P	0,0122 Nm	24,09 gramas	60
SRV Drive	0,169 Nm	8,78 gramas	15

Desses motores da Tabela 2, os motores da fabricante *Pololu* se encaixaram melhor com as necessidades do projeto. Tais necessidades podem ser descritas como baixo peso, pequenas dimensões para sua fixação na palma da mão, torque relativamente alto em comparação com os demais e um dos preços mais acessíveis entre os citados, tendo dessa forma, o melhor custo/benefício.

Para que se possa escolher o melhor motor para o projeto, mais dois motores da mesma fabricante e que trabalham numa faixa parecida de rotação e torque foram analisados, vide Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação de motores Pololu disponíveis [11]

Motor	Redução	Rotação (RPM)	Torque (oz-in)	Preço (Dólares)
1	210:1	140	50	18.95
2	250:1	120	60	
3	298:1	100	70	

A partir dessa pré-seleção e de alguns outros fatores determinantes que serão melhor abordados na seção **3.4.4**, o motor escolhido para o trabalho foi o *250:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 12V*.

### 3.3.1.3. Características Gerais

#### a. Dados técnicos

O micromotor CC escolhido funciona com 12 Volts de tensão. Ele é composto de escovas de carbono que aumentam sua vida útil. A redução exata é de 248,98:1, o que faz com que a velocidade de seu eixo de saída seja igual a 120 RPM. A corrente, quando o motor não tem carga, equivale a 100mA, e sua corrente de *stall* é de 800 mA, produzindo um torque de saída de 60 oz-in ou 4,3 kg-cm.

Nesse componente, existem dois eixos. O primeiro está conectado diretamente no motor internamente, e tem uma parte que se estende para fora. Esse eixo será denominado como eixo primário no restante do trabalho. O segundo eixo sai da caixa de redução com a rotação de 120 RPM, e vai se conectar com o restante da parte mecânica do dedo. Este eixo será denominado de eixo de saída. Na Figura 10, a disposição desses eixos é mais facilmente percebida [11].

Figura 10 – Disposição dos eixos existentes no componente (Adaptado de [11])





#### b. Observações do componente

A versão utilizada neste trabalho conta com um eixo estendido na parte de trás do motor. Essa parte estendida serve para que o *encoder* magnético forneça a velocidade do motor e o *feedback* de posição.

Outro dado relevante é que os micromotores da *Pololu* que pertencem a mesma classe e tensão de operação (com a exceção do 1000:1), tem as mesmas dimensões físicas, e esse fator facilita uma mudança que venha a ocorrer no projeto, como por exemplo deixar o dedo mais rápido ou mais forte com a alteração da caixa de redução do motor empregado.

#### c. Dimensões

Na Figura 11 retirada do site da *Pololu* [11], são exibidas todas as dimensões do motor (milímetros sobre [polegadas]). Pode-se notar que este motor tem como dimensões principais 12 mm de largura, 10 mm de altura e 40,2 mm de comprimento, que, de fato, facilitam a sua alocação dentro de uma mão humana adulta, fornecendo, ainda, uma razoável distância entre eles, Figura 12.

Figura 11 - Dimensões do motor com escovas de carbono (HPCB) [11]

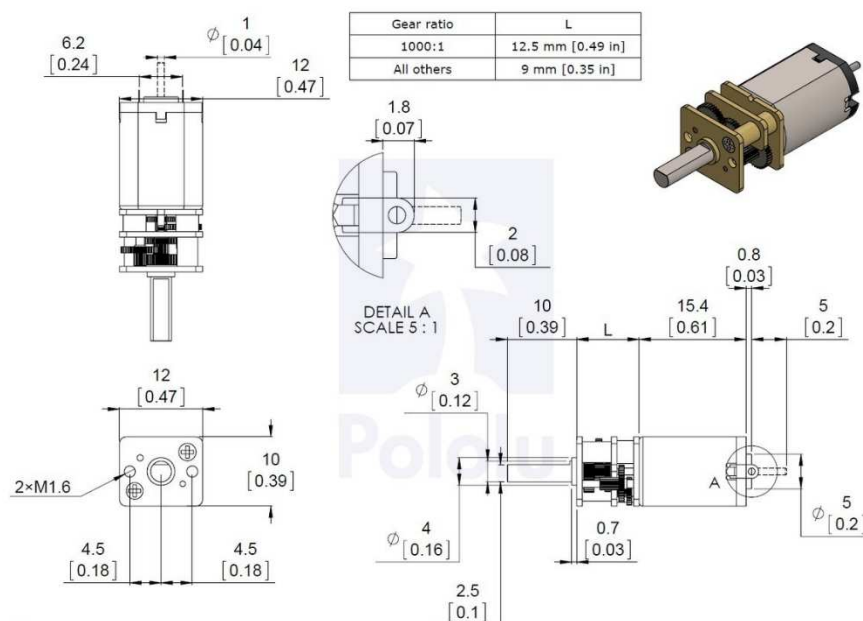


Figura 12 – Mão Humana com os motores alocados em seu lugar de utilização



#### d. Funcionamento

Esse motor funciona a partir de um *drive*, que é acoplado na parte de trás do componente. O *drive* faz o controle de rotação no sentido horário ou anti-horário, de acordo com os sinais enviados pelo microcontrolador.

#### e. Preço

A unidade do componente custa 18,95 dólares [11].

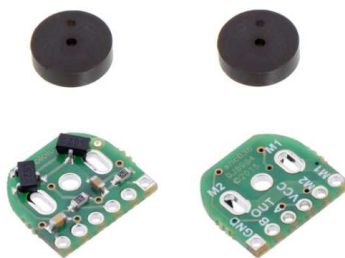
### 3.3.2. Encoder

#### 3.3.2.1. Descrição geral do componente

O *encoder* tem a função de contar os pulsos à medida que o eixo se rotaciona. Essa contagem pode ser realizada de algumas formas diferentes que vão depender de cada sensor, e faz com que seja possível realizar um controle mais preciso da velocidade do eixo do motor, assim como também fornece um *feedback* da posição em que o eixo está.

Essas características do *encoder* são importantes neste trabalho pois com a velocidade e a posição do motor é possível realizar um bom controle do dedo. Na Figura 13 é apresentado o *encoder*.

Figura 13 – Encoder Magnético [11]



#### 3.3.2.2. Escolha do componente

O *encoder* escolhido é o “*Magnetic Encoder Pair Kit for Micro Metal Gearmotors, 12 CPR, 2.7-18V (HPCB compatible)*”. Esse *encoder* magnético foi escolhido, primeiramente, porque ele é compatível com o micromotor escolhido, ao contrário do *encoder* ótico da mesma fabricante. Um outro fator que pesou a seu favor foi a boa taxa de medidas de dados que ele proporciona. Essa taxa é de extrema importância para uma boa precisão de movimentação do dedo [11].

#### 3.3.2.3. Características Gerais

##### a. Dados técnicos

Esse *encoder* utiliza o método de quadratura a partir de um disco magnético e de dois sensores de efeito *hall*, que fornecem uma resolução de 12

contagens por volta do eixo primário do motor. Esse *encoder* pode operar de 2,7 V até 18 V e provê saídas digitais que podem ser conectadas diretamente a um microcontrolador e a outros circuitos digitais [11].

#### b. Dimensões

Esse *encoder* é compacto o suficiente para se encaixar atrás do motor, se estendendo para fora das medidas de 12 mm x 10 mm em apenas um lado dos quatro existentes. Mesmo assim, ele apenas ultrapassa 0,6 mm a parede do motor. A montagem do *encoder* no motor pode ser percebida na Figura 14 [11].

Figura 14 – Montagem do *encoder* no micromotor *Pololu* [11]



#### c. Funcionamento

O *encoder* é feito para ser soldado nos dois terminais do motor na parte de trás, que estarão diretamente conectados aos pinos nomeados de “M1” e “M2”.

Os sensores são alimentados através do pino VCC e GND, e o VCC, pode ser alimentado de 2,7 V até 18 V. É apresentado na Figura 15 a relação de terminais do *encoder*.

Figura 15 – Pinagem do *encoder* [11]



As saídas A e B fornecem um sinal digital de saída 0 V (*low*) quando o disco não passa pelo sensor, e fornece uma tensão VCC (*high*) quando o disco está

passando pelo sensor. Sendo assim, a quantidade de saídas necessárias ao componente são duas (2) saídas digitais.

#### d. Preço

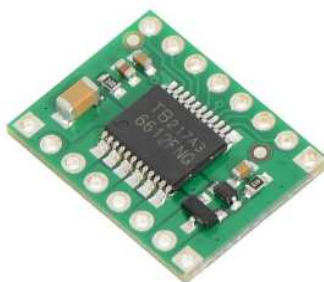
O componente vem em par, e custa 8,95 dólares, ou seja 4,475 dólares a unidade [11].

### 3.3.3. Driver

#### 3.3.3.1. Descrição geral do componente

O *driver* é um componente essencial para o bom funcionamento do micromotor, uma vez que é o driver quem de fato controla o micromotor acoplado a ele. O *driver* fará o controle dos terminais do motor, rotacionando-o no sentido horário ou anti-horário, controlando também por meio de um sinal PWM (“*Pulse-Width Modulation*” ou em português, “Modulação por Largura de Pulso”) sua velocidade. A Figura 16 mostra o *driver* empregado neste projeto.

Figura 16 - *TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier* [11]



#### 3.3.3.2. Escolha do componente

Existem diferentes tipos de *drivers* que podem ser adquiridos no site da *Pololu*, e que podem realizar o controle do motor empregado neste trabalho. A seguir, são apresentados, na Tabela 4, as principais características desses principais *drivers*. Os três primeiros componentes foram sugeridos pela própria *Pololu*, enquanto o último foi pesquisado separadamente.

Tabela 4 – *Drivers* disponíveis para o micromotor do projeto (Adaptado de [11])

Drivers					
Nome	Motores Controlados	Tensão de Alimentação (V)	Corrente Fornecida		Preço (Dólares)
			Máxima (A)	Contínua (A)	
MAX14870	1	4,5 - 36	2,5	1,7	5,95
DRV8801	1	8 - 36	2,8	1	4,95
A4990	2	6 - 32	0,9	0,7	5,95
TB6612FNG	2	4,5 - 13,5	3	1	5,95

Com base nas informações levantadas, o *driver* que melhor atende aos requisitos do motor e do projeto é o *driver* “*TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier*”, por conta dos seguintes tópicos:

- Trabalha numa tensão de alimentação que se assemelha a do motor escolhido, e seu preço é muito semelhante aos demais,

- Pode acionar simultaneamente dois motores. Essa característica é importante quando peso e espaço são fatores limitadores do projeto, pois deste modo, não serão necessários 6 *drivers* para acionar 6 motores. Essa característica exclui os dois primeiros *drivers* da tabela.

- O fator que elimina o A4990 e define o TB6612FNG como o *driver* do trabalho é que este último consegue fornecer ao motor uma corrente de 1 A contínua e 3 A de corrente de pico. A corrente de pico é importante pois no projeto, o dedo será acionado várias vezes com carga, e logo em seguida entrará em repouso. Com isso, não haverá um funcionamento que leva o motor a girar constantemente, como, por exemplo um veículo, sendo necessário que o *driver* aguente uma corrente de pico elevada, já que essa situação ocorrerá diversas vezes quando o motor for acionado a partir do repouso. Portanto, o *driver* *TB6612FNG* é o escolhido.

### 3.3.3.3. Características Gerais

#### a. Dados técnicos

Como mencionado anteriormente, o TB6612FNG proporciona o controle simultâneo de dois micromotores por meio de duas pontes-H. Ele é recomendado para motores com tensão de trabalho entre 4,5 V e 13,5 V. Sua tensão de

alimentação varia de 2,7 V até 5,5 V. Ele tem também, embutido em seu sistema, um sistema de desligamento caso a temperatura da placa fique muito alta, além de conter um sistema de proteção ao motor, caso o mesmo atue indesejadamente como “fonte”. Todas essas características o tornam um ótimo *driver* para motores de baixa potência [11].

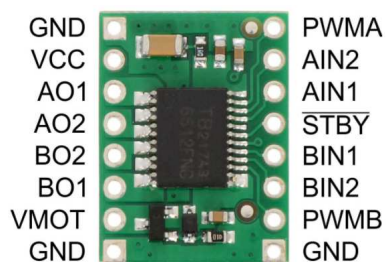
#### b. Dimensões

Possui dimensões de 15,24 x 20,32 mm, o que o torna um componente fácil de alocar na palma da mão para a posterior criação de uma mão robótica.

#### c. Funcionamento

Na relação de terminais do componente, existem as portas de entrada iniciadas com “A” e outras com “B”, assim como portas de saída. Essas letras iniciais representam qual é o motor que será acionado de acordo com a ligação feita, pois as portas “A” utilizam da ponte-H “A”, e da mesma forma para as portas “B”. Na Figura 17, é apresentada a pinagem do componente.

Figura 17 – Pinagem do *driver TB6612FNG* [11]



Para o funcionamento do *driver*, as portas IN1, IN2, PWM e STBY devem ter seus valores corretamente passados pelo microcontrolador para que o motor se rotacione no sentido desejado, ou pare quando requisitado. Para que isso ocorra, devem ser passados ao *driver* os valores expostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Tabela de comando do *driver-micromotor* (Traduzido de [12])

Entrada				Saídas		
IN1	IN2	PWM	STBY	OUT1	OUT2	Modo
H	H	H/L	H	L	L	Freio
L	H	H	H	L	H	Sentido Anti-Horário
		L	H	L	L	Freio
H	L	H	H	H	L	Sentido Horário
		L	H	L	L	Freio
L	L	H	H	OFF		Parar
H/L	H/L	H/L	L	OFF		<i>Standby</i>

Segundo a Tabela 5, é necessário para que o motor gire no sentido horário que as entradas PWM, STBY e IN1 sejam altas (H – *High*), e a IN2 seja baixa (L – *Low*). Com isso, as saídas OUT1 e OUT2 serão respectivamente *High* e *Low* fazendo que a ponte-H respectiva, “A” ou “B” interna ao circuito, comande corretamente o micromotor. As outras ações do motor seguem o mesmo princípio descrito anteriormente [12].

Sendo assim a quantidade de entradas e saídas necessárias ao componente são quatro (4) entradas digitais e duas (2) saídas digitais.

#### d. Preço

O componente custa 4,95 dólares [11].

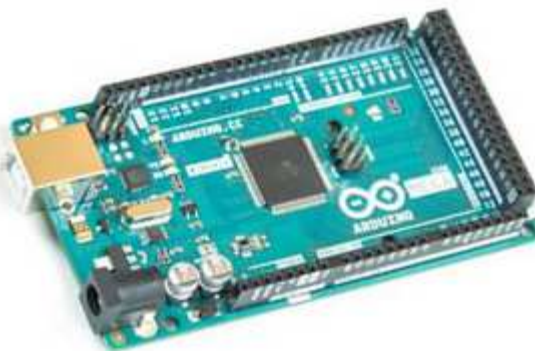
### 3.3.4. ARDUINO MEGA 2560

#### 3.3.4.1. Descrição geral do componente

A placa Arduino Mega 2560, Figura 18, é um microcontrolador baseado no ATmega2560 dando assim o nome à placa. Essa placa pode ser descrita como o centro de controle de todo o sistema, unindo todos os componentes utilizados e fazendo uso de cada dado colhido para coordenar o funcionamento de todo o sistema, por meio de uma programação desenvolvida e gravada na placa pelo programador.



Figura 18 – Arduino Mega 2560 [13]



#### 3.3.4.2. *Escolha do componente*

A placa Arduino Mega 2560 foi escolhida para este projeto principalmente, por conta da quantidade de pinos de entradas e saídas digitais e analógicas, saídas PWM para o controle dos motores, por possuir 4 UARTs, e também por fornecer uma maior quantidade de memória FLASH.

Essa placa facilmente controla não apenas um dedo, mas uma mão completa com cinco dedos e seis motores. No entanto, como ainda não existe um design final da palma da mão com todos os dedos, é possível que, mediante a limitação das dimensões da palma da mão, haja uma alteração desse microcontrolador para um outro de menor dimensão [13].

#### 3.3.4.3. *Características Gerais*

##### a. Dados técnicos

O Arduino Mega 2560 possui um microcontrolador ATmega2560, uma tensão de operação de 5 volts e uma alimentação que pode variar de 7 a 12 volts.

Existem 54 entradas e saídas digitais, das quais 15 podem ser utilizadas como PWM, 16 entradas analógicas. 248 KB de memória FLASH utilizáveis, 8 KB de SRAM e 4 KB para a EEPROM, com uma velocidade do *clock* de 16 MHz.

#### b. Dimensões

As dimensões da placa são de 101,6 x 53,4 mm, com um peso de 150 gramas. Talvez essa placa não seja a mais adequada para a alocação dentro da palma da mão, porém ela é boa o bastante para a operação da prótese completa.

Futuramente, pode vir a ser necessária uma maior pesquisa visando encontrar uma placa que comporte a operação da mão, e também seja mais leve e menor, podendo desse modo otimizar o espaço gasto na palma da mão.

#### c. Preço

O preço do Arduino Mega 2560 gira em torno de 250 reais, no Brasil, e 39 dólares na loja Arduino [13][14]. Além da placa da fabricante Arduino, existem também algumas versões similares da placa que podem ser encontradas em lojas de eletrônica, custando por volta de 75 reais no Brasil [15].

### 3.3.5. Bateria

#### 3.3.5.1. *Descrição geral do componente*

A bateria é a fonte de alimentação de todos os componentes do sistema e deve atender à necessidade de trabalho do sistema, ou seja, deve fornecer energia à medida que o sistema é utilizado e deve ter uma duração de trabalho condizente à utilização de um dedo (mais futuramente à utilização de uma mão). Na

Figura 19, é apresentada a bateria escolhida para o projeto.

Figura 19 – Zippy 11.1V 2200mah 30C



### 3.3.5.2. Escolha do componente

A escolha do componente veio da observação das características necessárias para uma boa operação do dedo, com isso foi selecionada a bateria adequada. Abaixo estão dispostas as características analisadas:

(1) Tensão de alimentação dos componentes – Em sua maioria, os componentes selecionados aceitam até 12V para sua operação. Com isso, a bateria selecionada deverá fornecer perto de 12V ao sistema, neste caso, será 11,1V que não afetará em nada a operação do sistema.

(2) Carga Elétrica – O micromotor é o componente que mais exige corrente da bateria, por isso foi especificado que a bateria deverá supri-lo com uma margem para a operação de outros componentes. O micromotor quando começa a funcionar, a partir do repouso, demanda 0,8 A. A bateria escolhida fornece 2,5 vezes a corrente máxima do micromotor, com isso a bateria suporta no mínimo 2000 mAh somente ao micromotor, sendo o restante uma margem de segurança para os outros componentes.

(3) Taxa de descarga – A taxa de descarga da bateria deverá ser maior que 10C, pois, caso seja necessária a utilização do dedo de maneira menos pausada, é necessário que a bateria possa fornecer toda a corrente exigida. Por exemplo, com uma taxa de 10C e uma carga de 1600 mAh, a bateria consegue fornecer 16000 mA por 6 minutos.

Considerando essas características a bateria Zippy, Li-PO com 11,1V 2200mAh e 30C cumpre com todos os requisitos necessários.

### 3.3.5.3. *Características Gerais*

#### a. Dimensões e Peso

As dimensões da bateria são de 104 x 32 x 22 mm. Sua dimensão não a torna uma bateria pequena, mas que, em primeira instância cumpre com o objetivo requisitado. Ela não é a mais leve das baterias com 152 g, mas como a principal necessidade do projeto é a afirmação de sua funcionalidade, a bateria utilizada cumpre com os requisitos dos componentes [16].

#### b. Preço

O preço do componente no Brasil gira em torno de 149 reais [16].

### 3.3.6. **Controle Remoto**

#### 3.3.6.1. *Descrição geral do componente*

O controle remoto tem a função de facilitar ao utilizador o acionamento da prótese, podendo fixá-lo em um local, ou carregá-lo no bolso, por exemplo. Esse componente funciona enviando um sinal infravermelho ao receptor, que recebe a informação do controle e a envia ao microcontrolador. O conjunto controle remoto e receptor pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Controle remoto e receptor [17]



#### 3.3.6.2. *Características Gerais*

##### a. Dados técnicos

O controle remoto funciona com uma bateria de 3 volts, em uma frequência de trabalho de 38 kHz, podendo ser utilizado com a distância de até 8

metros. Já o receptor, trabalha com uma tensão de alimentação de 5 volts, uma frequência de trabalho igual ao do controle, e conseguindo detectar o sinal emitido pelo controle caso esse sinal chegue com uma angulação de até +/- 60° no receptor [17].

#### b. Dimensões

O receptor tem as dimensões de 19 x 15,5 x 11,5 milímetros, o que o torna um componente bem fácil de se alocar dentro da palma da mão. Já o controle remoto, poderá ser alocado no antebraço, ou em outro lugar que o utilizador desejar.

#### c. Preço

O conjunto completo do controle remoto custa, no Brasil, em torno de 15 reais [17].

### 3.3.7. Fim de Curso

#### 3.3.7.1. *Descrição geral do componente*

O fim de curso será utilizado para realizar a calibração do dedo robótico, assim como para realizar o controle de movimento do mecanismo. Para isso, existem duas possibilidades de escolha para o sensor fim de curso no projeto.

A primeira possibilidade é a chave fim de curso vista na Figura 21. Ela contém um pequeno módulo eletrônico, acoplado a uma haste metálica de 13 milímetros. Ao ser pressionada, a haste aciona um *micro switch* que enviará um sinal lógico ao microcontrolador, que conseqüentemente tomará uma ação conforme o programado.

Figura 21 – Chave fim de curso [18]



A outra possibilidade é a utilização de um *push button*, como o da Figura 22, que funcionará basicamente igual à chave mostrada anteriormente. No entanto, ao se utilizar o *push button*, têm-se a vantagem de que sua dimensão é muito menor comparada à chave, porém é necessário um circuito simples com um resistor de *pull-up* para que o sinal não fique flutuando entre os valores de zero e um.

Figura 22 – *Push button* [19]



### 3.3.7.2. Escolha do componente

Por conta da menor dimensão necessária ao trabalho, e da facilidade de se construir o circuito com um *pull-up* que fornece corretamente o sinal digital ao microcontrolador, o *push button* foi o componente escolhido para o projeto.

Porém, algo que deve ser lembrado, é que esse componente devido a suas características de construção produz um ruído que poderá afetar o controlador. No entanto, é possível evitar tal inconveniente utilizando um circuito passa baixa ou até mesmo uma biblioteca disponível no Arduino.

### 3.3.7.3. Características Gerais

#### a. Dados técnicos

O *push button* funciona com uma tensão de alimentação de 5 volts, e envia sinal de alto ou baixo de acordo com a sua operação. O circuito de *pull-up* existe internamente no microcontrolador escolhido para o projeto, sendo necessário apenas que seja programado corretamente.

#### b. Dimensões

As dimensões do componente são 6 x 7 x 6 milímetros, um tamanho que pode ser fixado no mecanismo de acionamento do dedo facilmente [20].

#### c. Preço

Cinco unidades do componente custam, no Brasil, 2 reais [29].

### 3.3.8. Sensor de pressão

#### 3.3.8.1. Descrição geral do componente

O sensor de pressão ou FRS, Figura 21, utiliza um polímero condutor, que altera sua resistência de forma previsível de acordo com a força que é exercida sobre ele, podendo dessa forma, identificar qual a magnitude dessa força. Esse componente será essencial ao dedo robótico, pois evitará uma força demasiada sobre seus componentes mecânicos, fato esse que poderia danificá-lo.

Figura 23 – Sensor de Pressão [22]



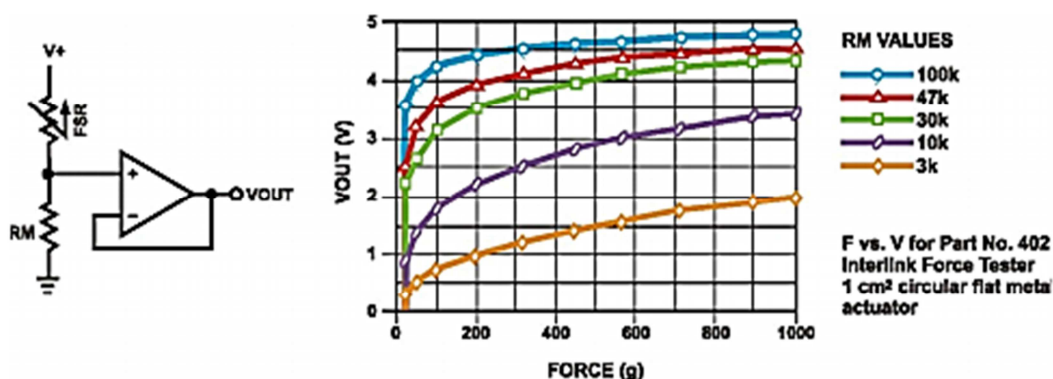
#### 3.3.8.2. Características Gerais

a. Dados técnicos

O sensor de pressão utilizado no projeto pode identificar forças entre 100 gramas e 10 quilogramas, mesmo com um tamanho 62 centímetros de comprimento (podendo ser diminuído). Sua tensão de alimentação é de 5 volts, para uma tensão de saída dada, conforme a equação (1) para o circuito da Figura 24, que também apresenta a relação dos valores de saída segundo a resistência utilizada [22].

$$V_{Out} = \frac{R_M V^+}{(R_M + R_{FSR})} \quad (1)$$

Figura 24 – Circuito indicado para o sensor de pressão [22]



b. Preço

O sensor de pressão custa 19,90 dólares [23].

### 3.4. CRIAÇÃO DO DEDO ROBÓTICO

Nesta seção, serão abordados o desenvolvimento mecânico e a criação do design do dedo robótico.

#### 3.4.1. Desenhos

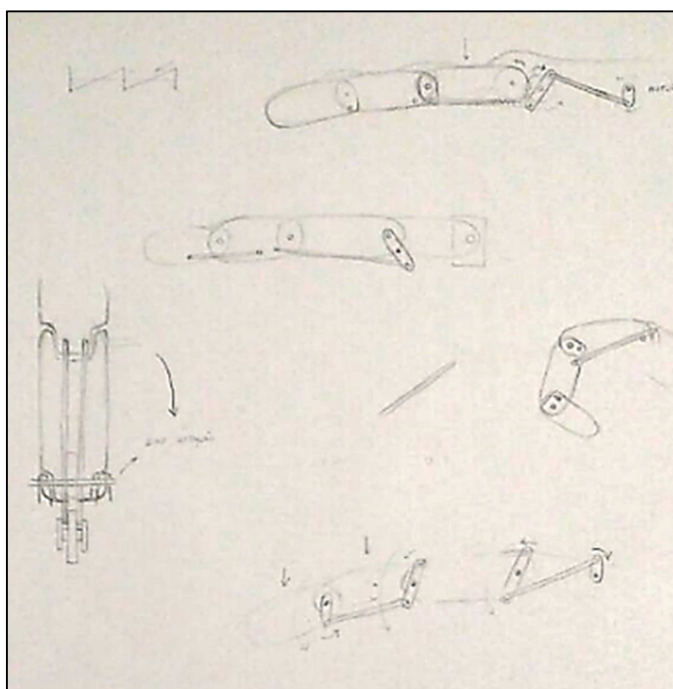
Primeiramente, o desenvolvimento da parte mecânica do projeto foi iniciado com a elaboração de alguns desenhos à mão, visando espalhar um pouco das ideias iniciais sobre o projeto. Essas ideias incluíam fatores sobre as barras de



movimento, a alocação de alguns componentes, e o design do dedo. Nas figuras 25 a 27 estão expostos alguns dos esboços.

A primeira ideia, retratada na Figura 25, tinha como interesse a construção de um dedo que pudesse se movimentar igual a um dedo humano. Essa linha de pensamento faria com que a prótese necessitasse de movimentar todas as articulações antes mencionadas. Porém, essa ideia foi prontamente abandonada por conta que o último osso do dedo humano, a falange distal, não mostrava um acréscimo considerável nas funções do dedo robótico, além de claro, trazer mais peso à prótese devido a adição de mecanismos que seriam também difíceis de alocar nas dimensões restritas do projeto.

Figura 25 – Primeiro esboço do mecanismo de movimento



No segundo desenho, exibido na Figura 26, foi levado em consideração que a falange distal seria fixada junto à falange medial, dessa forma, não seria possível sua movimentação separada.

Nessa parte do projeto, entendeu-se que seria necessário um protótipo real do mecanismo para que se pudesse validar sua movimentação, foi então que se decidiu construir de LEGO o protótipo da mecânica básica da prótese. Com isso, no

segundo desenho também foi levado em consideração o formato das peças de LEGO, pois assim a ideia poderia ser mais facilmente implementada em escala real.

Já o último desenho, Figura 27, é possível notar que houve uma maior preocupação com o aspecto humano do mecanismo, indicando desse modo, uma inclinação de como se é pensado o design final da prótese.

Figura 26 – Desenho mais elaborado do mecanismo para base de *LEGO*

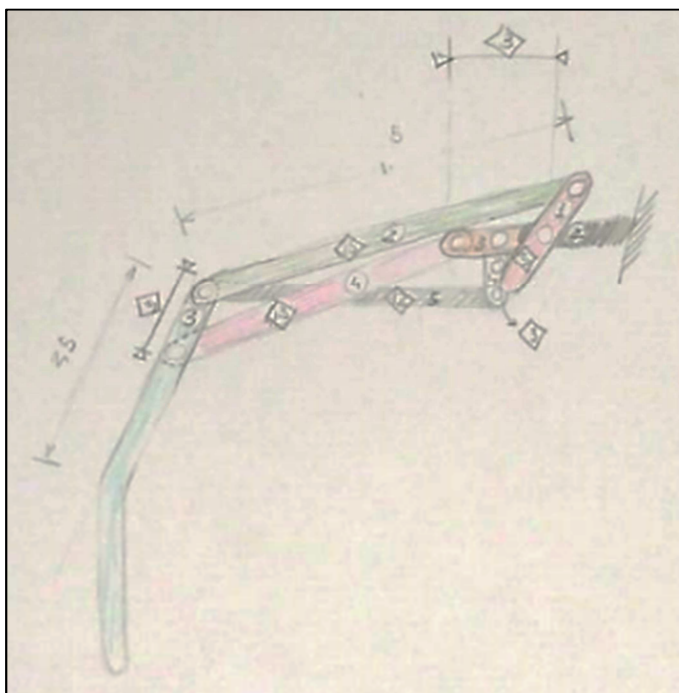
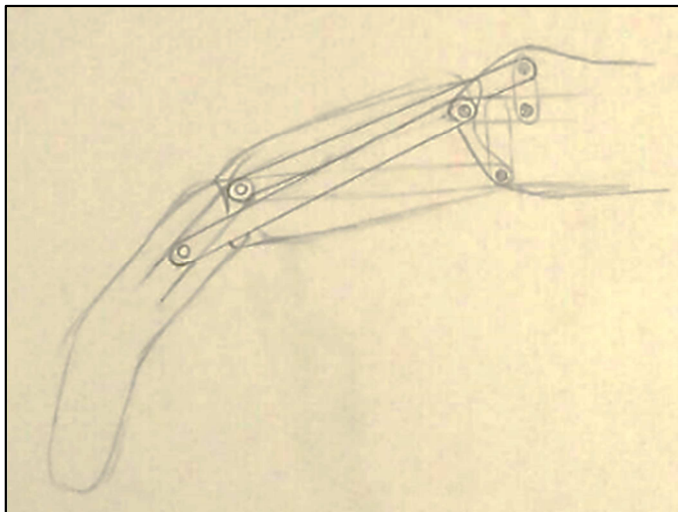


Figura 27 – Desenho base para o design mais real do dedo



### 3.4.2. Lego

Após os esboços realizados, a lápis, foram necessários os testes do mecanismo na prática, e para isso foi utilizado o *LEGO TECHNIC*. Na Figura 28, na Figura 29 e na Figura 30 pode ser visto, sempre à esquerda, o dedo aberto; e, à direita, o modelo com o dedo fechado.

Nessas figuras também pode ser vista a evolução dos protótipos, já que, durante o desenvolvimento, vários pontos puderam ser aprimorados. Na última, Figura 30, é apresentado o mecanismo final em *LEGO*, o qual será a base para o desenvolvimento final dos modelos 3D em *Solidworks*.

Figura 28 – Dedo 1 desenvolvido em *LEGO*



Figura 29 – Dedo 2 desenvolvido em *LEGO*

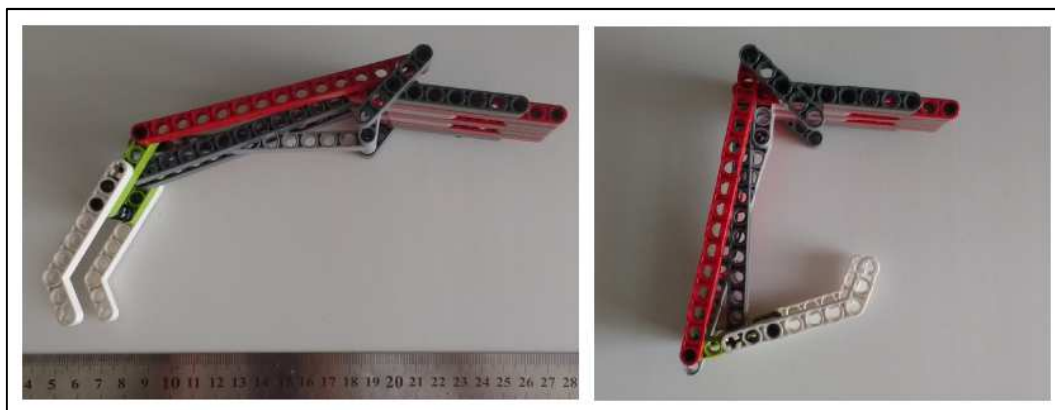


Figura 30 – Dedo 3 desenvolvido em *LEGO*



Observando as figuras, é possível afirmar que o mecanismo desenvolvido em LEGO ainda é muito grande ao se comparar com um dedo humano, pois o mecanismo mede em torno de 24 a 28 centímetros, enquanto um dedo humano tem dimensões que giram em torno de 8 a 12 centímetros. Por isso, é importante que a diminuição do tamanho do modelo seja um dos objetivos nos próximos passos do projeto.

### 3.4.3. Design Virtual – *SolidWorks*

O mecanismo de movimentação do dedo, desenvolvido e validado por meio da sua construção em LEGO, agora deverá ser construído no *Solidworks* com o intuito de ser aprimorado e lapidado, para que dessa forma se consiga chegar a um design final, que atenda a todos os objetivos antes traçados.

#### 3.4.3.1. Modelo 3D - 1

O primeiro modelo desenhado em *Solidworks*, Figuras 31 e 32, teve como proposta a implementação do projeto desenvolvido em *LEGO*, pois dessa maneira será possível identificar as falhas, e aprimorar o que deu certo.

Figura 31 – Visão lateral mais humana do Modelo 1

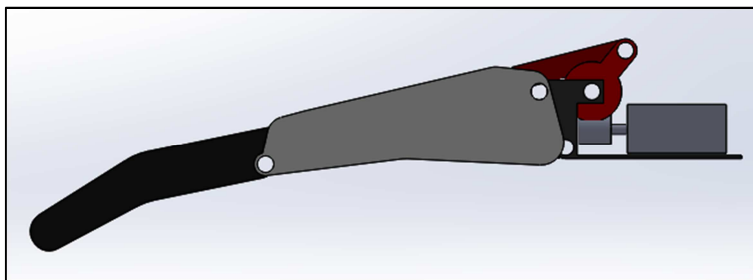
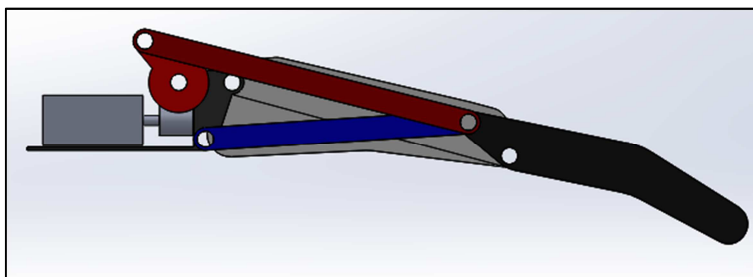


Figura 32 – Visão lateral do mecanismo do Modelo 1



Nesta etapa do projeto, o principal objetivo era alocar o micromotor em uma posição que não ocupasse muito espaço, não prejudicando assim as dimensões da mão humana. Com base nesses requisitos, decidiu-se construir um mecanismo de coroa e rosca sem-fim representado no Modelo 1.

As modificações mais aparentes em relação ao modelo real em *LEGO* foram as seguintes: a capa que cobre a barra cinza no meio do dedo, a coroa em vermelho junto da barra que movimentava o dedo – também em vermelho – a adição do motor em tamanho real e a representação da rosca sem-fim que será utilizada acoplada ao motor.

#### 3.4.3.2. Modelo 3D – 2

O segundo modelo 3D do dedo, Figuras 33 e 34, teve como principal objetivo o ajuste das dimensões dos componentes, assim como a modelagem dos

aspectos físicos do dedo para se parecer mais fielmente a um dedo humano. Com o redimensionamento das partes e o acréscimo de espessura, foram necessários alguns ajustes nas partes móveis do dedo para que o sistema de movimentação continuasse a funcionar corretamente.

A construção do Modelo 2 foi de grande importância para a continuação do processo de criação do projeto, isso porque o modelo 2 se mostra muito mais semelhante a um dedo humano que os modelos anteriores. Dessa forma, é possível nessa fase voltar os esforços para o conjunto que transmitirá a força do motor ao restante da estrutura, o conjunto coroa e rosca sem-fim.

Figura 33 – Vista lateral do Modelo 2

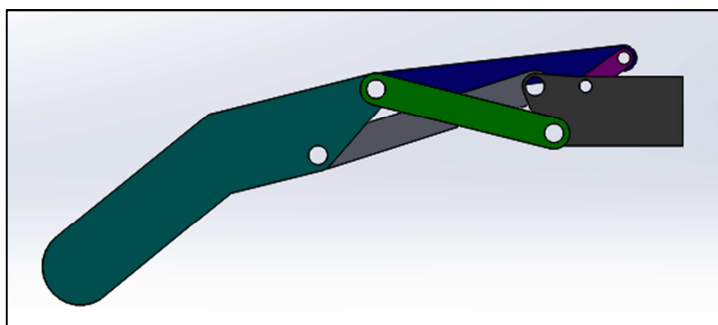
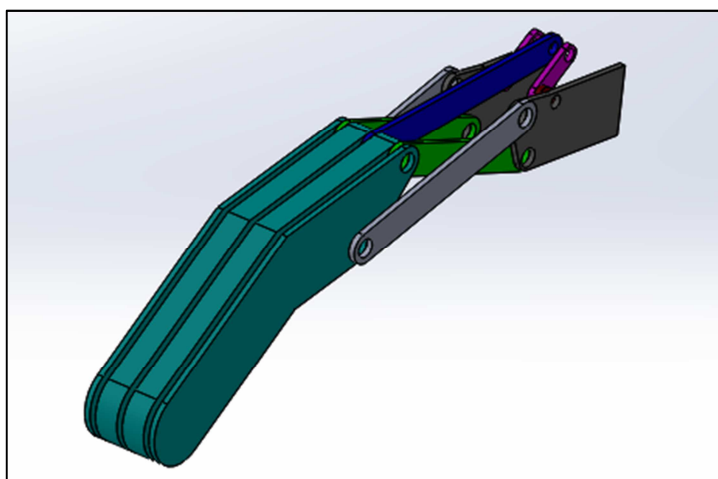


Figura 34 – Vista em 3D do Modelo 2



#### 3.4.4. Coroa e Rosca sem-fim

Calcular corretamente as dimensões podendo assim implementar o conjunto Coroa e Rosca sem-fim no projeto é uma das partes mais importantes, senão a mais importante do projeto. Pois é com esse conjunto que será possível a transmissão de força e, conseqüentemente a movimentação da prótese, possibilitando de acordo com o seu projeto, aumentar ou diminuir a velocidade do dedo, tal como sua força.

Alguns dados são fixos e não podem ser alterados por serem características dos componentes escolhidos. Portanto é necessário que o início do desenvolvimento do conjunto Coroa e Sem-fim se dê a partir dessas características, como a RPM e o Torque dos motores pré-escolhidos, vide Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação de motores Pololu disponíveis

Motor	Redução	Rotação (RPM)	Torque (oz-in)	Preço (Dólares)
1	210:1	140	50	17.95
2	250:1	120	60	
3	298:1	100	70	

Dispondo dessas informações, é necessário então selecionar qual motor é o mais adequado ao projeto. Sendo assim dois requisitos para o projeto deverão ser atendidos:

(1) O dedo deverá alcançar a sua posição de totalmente fechado em aproximadamente 2 segundos. Esse tempo de atuação proposto foi definido com base nas análises realizadas anteriormente, e resultará em uma atuação desejável do dedo.

(2) A coroa não deve ficar nem muito maior, nem muito menor do que o desenhado no Modelo 2, que possui sua dimensão girando em torno de 17 a 19 mm de diâmetro, Figura 35. Dessa forma, não ocorrerá uma grande mudança no projeto, o que poderia acarretar em mudanças em seu mecanismo de movimentação.

Figura 35 – Eixo de movimento com tamanho de 9 mm

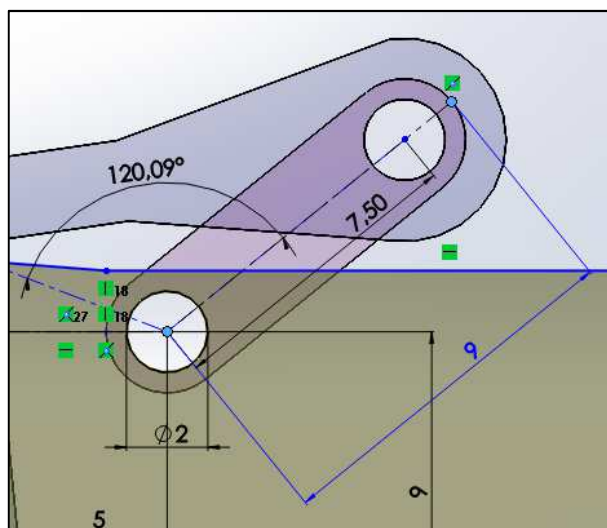
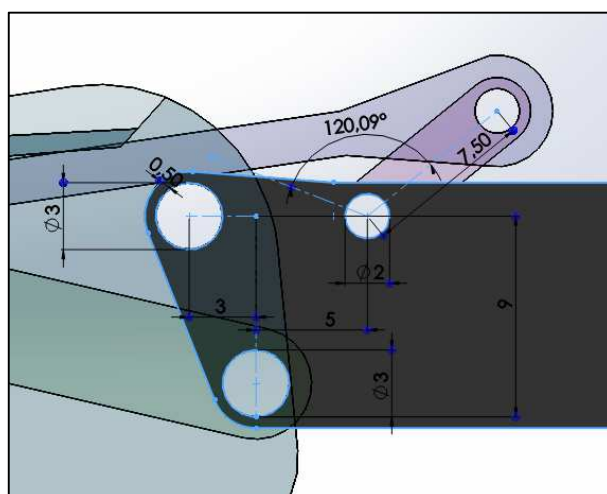


Figura 36 – ângulo de trabalho da coroa



Para cumprir com o primeiro requisito descrito anteriormente foi analisado o Modelo 2, e, com isso, pôde-se concluir que a coroa, desde a abertura do dedo até o fechamento, se desloca  $120^\circ$ , vide Figura 36. Esse ângulo é o maior ângulo que a coroa se deslocará na operação do dedo, sendo denominado de ângulo de trabalho da coroa.

Portanto, é possível determinar qual deverá ser a RPM da coroa para que a atuação do dedo ocorra em 2 segundos, pois o ângulo máximo de atuação da coroa é  $120^\circ$ , logo, a cada 1 segundo o dedo deve se mover  $60^\circ$ . Desse modo, o seguinte pensamento pode ser utilizado:





**60° em 1 segundo → 360° em 6 segundos →**  
**→ 1 rotação completa a cada 6 segundos →**  
**→ 10 rotações completas a cada 60 segundos →**  
**→ 10 RPM**

E, assim, a coroa deverá girar a 10 RPM para cumprir o primeiro requisito proposto.

Nessa etapa, para determinar qual motor mais se adequa ao conjunto, é necessário calcular quantos dentes existem na coroa. Esse cálculo é realizado utilizando a equação (2) [24].

$$N_c = \frac{N_p \cdot N_e}{Z_c} \quad (2)$$

Onde:  $N_c$  = RPM da coroa

$N_p$  = RPM da rosca sem-fim

$N_e$  = Números de entradas da rosca sem-fim

$Z_c$  = Número de dentes da coroa

As entradas da rosca sem-fim podem ser comparadas, em suas devidas proporções, aos dentes da coroa. O número de entradas impacta diretamente no sistema de transmissão, portanto é de extrema importância que sejam dimensionadas corretamente. Com isso, dois fatores foram de fundamental importância para a escolha do número de entradas. São eles:

(1) Em primeira instância, a rosca sem-fim será produzida a partir de uma impressora 3D. Com isso, é necessário que os elementos a serem impressos contenham detalhes muito pequenos, pois isso acarreta em um maior tempo de produção, e, conseqüentemente, um aumento no custo da prótese. Logo, quanto menos entradas possíveis, mais fácil será a produção, e menor será o custo.

(2) O outro fator que se relaciona ao número de entradas é o número de dentes da coroa. Se apenas uma entrada for adotada, o número de dentes da coroa será muito pequeno, o que causaria uma mudança drástica no desenho construído, impactando diretamente em sua movimentação. De forma análoga, se fossem empregadas três ou mais entradas, a quantidade de dentes na coroa seria muito grande, causando um aumento das dimensões do desenho, o que prejudicaria o objetivo de manter na prótese uma dimensão próxima ao de uma mão humana adulta.

Então, de acordo com as considerações feitas anteriormente, foi determinado que a quantidade ideal de entradas para a rosca sem-fim são duas.

Com todos os dados prontos para o cálculo, a equação (2) foi utilizada para conseguir os seguintes resultados expostos na Tabela 7.

Tabela 7- Número de dentes na coroa para 10 RPM

Motor	Redução	Número de Dentes da Coroa
1	210:1	28
2	250:1	24
3	298:1	20

Tais resultados levam a algumas interpretações para a escolha do motor:

(1) Primeiramente, quanto maior o número de dentes na coroa, maior deverá ser o tamanho da coroa ou mais finos os dentes deverão ser, o que interfere na fragilidade do conjunto. A inversa também é verdade, quanto menos dentes na coroa, menor deverá ser o diâmetro da coroa, ou maior deverá ser a grossura dos dentes. Porém, quanto mais grossos os dentes, maiores as chances de prejudicar a movimentação da coroa junto ao sem-fim.

(2) Em segundo lugar, o torque exercido pelo motor também influencia na escolha final, porque um dedo humano deve exercer algumas funções que requerem força, como por exemplo pressionar e segurar botões e objetos.

Deste modo, o motor que mais se enquadra nos requisitos apresentados previamente é o motor número 2, Tabela 7, com a redução de 250:1. Esse motor transmite um pouco menos de torque que o motor número 3, porém, não necessita de tantos dentes na coroa quanto o motor número 1. Então, não será necessário alterar drasticamente o diâmetro da coroa, como ocorreria, caso o motor 3 fosse escolhido. Resumindo, foi escolhido um motor que não é o mais forte, nem é o mais rápido, no entanto, trata-se de um motor que cumpre bem ambos os papéis.

Antes de começar o cálculo geral do conjunto, é necessário escolher o diâmetro da rosca sem-fim, tendo em vista que essa medida será necessária para o restante dos cálculos, além do que, ela é de fundamental importância no ponto de vista da manutenção do motor.

Portanto, visando satisfazer tais objetivos, o diâmetro da rosca sem-fim foi definido em 10 milímetros. Essa decisão foi tomada, primeiramente, porque a altura do motor é de 10 milímetros, com isso, se a rosca sem-fim tem a mesma medida, é mais simples a alocação do motor e a troca desses componentes quando necessário. Sobre a troca, se o componente localizado na parte frontal do motor (rosca sem-fim) for de mesmo tamanho ou menor que o motor, a retirada de ambos é simplificada, pois esse componente poderá sair por onde o motor sai, não sendo assim necessária uma desmontagem completa do conjunto para tal.

Com as informações obtidas posteriormente é então possível começar a calcular as dimensões exatas do conjunto Coroa e Rosca sem-fim.

#### *3.4.4.1. Cálculos de dimensões do conjunto Coroa e Rosca sem-fim*

Inicialmente, é essencial listar todas as informações já obtidas, tanto as calculadas quanto as definidas anteriormente, Tabela 8 e

Tabela 9, visando, assim, uma melhor noção dos requisitos e necessidades do conjunto Coroa e Rosca sem-fim.

Tabela 8 – Dados definidos da Coroa

Coroa		
Dado	Abreviação	Valor
RPM da Coroa	$N_c$	10 RPM
Número de Dentes da Coroa	$Z_c$	24 Dentes
Diâmetro desejável da Coroa	$D_{des\ coroa}$	17 à 19 mm

Tabela 9 – Dados definidos da Rosca sem-fim

Rosca sem-fim		
Dado	Abreviação	Valor
RPM da Rosca sem-fim	$N_p$	120 RPM
Número de entradas da Rosca sem-fim	$N_e$	2 Entradas
Diâmetro máximo externo da Rosca sem-fim	$d_e$	10 mm

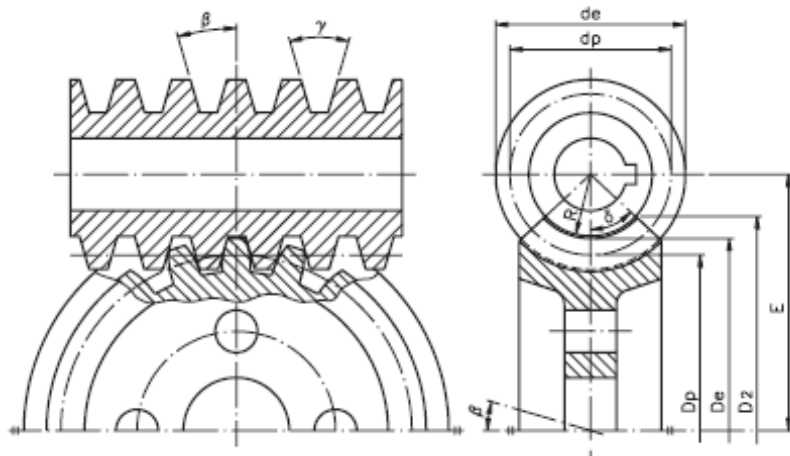
Uma planilha em *Excel* foi construída para realizar as operações matemáticas necessárias à todo o conjunto. Essa planilha foi de grande ajuda pois alguns valores como o valor do módulo do conjunto, somente foram encontrados empiricamente para atender ao requisito do diâmetro da coroa.

O Módulo do conjunto é um valor que integra e relaciona todas as dimensões dos componentes do conjunto, afetando-as de forma direta, pois é usada como base para o cálculo dos componentes. Logo, seu valor encontrado de forma empírica é 0,7.

$$M = \text{Módulo do conjunto} = 0,7$$

É de grande importância também saber quais são os dados, informações, e dimensões necessários para a construção de um conjunto Coroa e Rosca sem-fim, Figura 37.

Figura 37 – Dados do projeto Coroa e Rosca sem-fim [24]



Desse modo, serão apresentadas, a seguir, as equações utilizadas para a obtenção desses dados essenciais no desenho e, conseqüentemente, para a construção do conjunto Coroa e Rosca sem-fim.

#### 3.4.4.1.1. Rosca sem-fim

##### a. Passo rosca sem-fim:

A equação (3) determina o passo da rosca sem-fim e é dada por [24]:

$$P = M \cdot \pi \quad (3)$$

Onde:  $P$  = Passo da rosca sem-fim

Substituindo os valores,

$$P = 2,20 \text{ mm} \quad (4)$$

##### b. Avanço rosca sem-fim

O avanço de uma rosca é quanto essa rosca vai se deslocar a cada giro completo. Assim, com o passo encontrado pode-se calcular o avanço pela seguinte equação (5) [24]:

$$A = P \cdot N_e \quad (5)$$

Onde:  $A$  = Avanço da rosca sem-fim

Substituindo os valores,

$$A = 4,40 \text{ mm} \quad (6)$$

### c. Diâmetro primitivo da rosca sem-fim

O diâmetro primitivo de uma engrenagem ou uma rosca sem fim é o diâmetro externo do componente menos a medida da ponta do dente. Logo, o diâmetro pode ser calculado de acordo com a equação (7) [24].

$$d_p = d_e - (2 \cdot M) \quad (7)$$

Onde:  $d_p$  = Diâmetro primitivo da rosca sem-fim

Substituindo os valores,

$$d_p = 8,6 \text{ mm} \quad (8)$$

### d. Ângulo de pressão [ $\varphi$ ] e Ângulo de Flanco do Filete [ $\gamma$ ]

O ângulo de pressão deve ser escolhido pelo projetista, podendo variar de  $14,5^\circ$  até  $25^\circ$ . Como neste projeto não é tão necessário o estudo a fundo de qual ângulo de pressão é o melhor a ser utilizado, pois sua variação não interfere drasticamente na atuação do dedo robótico, então foi escolhido um ângulo de pressão de  $20^\circ$  que é utilizado normalmente para engrenagens padrão [24].

$$\varphi = 20^\circ \quad (9)$$

Com o ângulo de pressão definido, o ângulo de flanco do filete é encontrado da seguinte maneira pela equação (10) [24].

$$\gamma = 2 \cdot \varphi \quad (10)$$

Substituindo o valor,

$$\gamma = 40^{\circ} \quad (11)$$

#### e. Ângulo da Hélice

O ângulo da hélice da rosca sem-fim pode ser calculado de acordo com a equação (12) [24].

$$\beta = \arccos \left( \frac{d_p}{d_e} \right) \quad (12)$$

Onde:  $\beta$  = ângulo da hélice da rosca sem-fim

Substituindo os valores,

$$\beta = 9,4^{\circ} \quad (13)$$

#### 3.4.4.1.2. Coroa

##### f. Passo da coroa

O passo da coroa deverá ser igual ao da rosca sem-fim para que se acoplem corretamente.

##### g. Diâmetro primitivo da coroa

O diâmetro primitivo da coroa pode ser calculado de acordo com a equação (14) [24].

$$D_p = M \cdot Z_c \quad (14)$$

Onde:  $D_p$  = Diâmetro primitivo da coroa

Substituindo os valores,

$$D_p = 16,8 \text{ mm} \quad (15)$$

#### h. Diâmetro externo da coroa

O diâmetro externo da coroa pode ser calculado de acordo com a equação (16) [24].

$$D_e = D_p + (2 \cdot M) \quad (16)$$

Onde:  $D_e$  = Diâmetro primitivo da coroa

Substituindo os valores,

$$D_e = 18,2 \text{ mm} \quad (17)$$

O valor encontrado para o diâmetro externo da coroa condiz com o requisito de projeto de ter o diâmetro da coroa entre 17 e 19 mm para que o projeto não necessite de grandes mudanças.

#### 3.4.4.1.3. Dados Complementares

##### i. Alturas dos dentes da Coroa e Rosca sem-fim

A altura da cabeça do dente é dada pela equação (18) [24].

$$a = M \quad (18)$$

Onde:  $a$  = Altura da cabeça do dente  $a$

A altura do pé do dente para um ângulo de pressão igual a  $20^\circ$  é dada pela equação (19) [24].

$$b = 1,25 \cdot M \quad (19)$$

Onde:  $b$  = Altura do pé do dente

A altura total do dente é então dada pela equação (20) [24].

$$h = a + b \quad (20)$$



Onde:  $h$  = Altura total do dente

Logo, ao substituir todos os valores têm-se,

$$a = 0,7 \quad b = 0,875 \quad h = 1,575 \quad (21)$$

#### j. Espessura do dente

A espessura do dente pode ser calculada utilizando a equação (22) [24].

$$s = \frac{P}{2} \quad (22)$$

Onde:  $s$  = Espessura do dente

Substituindo os valores,

$$s = 1,10 \text{ mm} \quad (23)$$

#### k. Distância entre eixos da coroa e rosca sem-fim

A distância entre os eixos da coroa e rosca sem-fim são determinados pela equação (24) [24].

$$E = \frac{d_p + D_p}{2} \quad (24)$$

Onde:  $E$  = Distância entre eixos da coroa e rosca sem-fim

Substituindo os valores,

$$E = 12,7 \text{ mm} \quad (25)$$

#### l. Largura da coroa

A largura da coroa pode ser calculada utilizando a equação (26) [25].

$$l = 8 \cdot M \quad (26)$$

Onde:  $l$  = Largura da coroa

Substituindo os valores,

$$l = 5,6 \text{ mm} \quad (27)$$

### m. Raio de contato da coroa

O raio de contato da coroa é calculado utilizando a equação (28) [24].

$$R = E - \frac{D_e}{2} \quad (28)$$

Onde:  $R$  = Raio de contato da coroa

Substituindo os valores,

$$R = 3,6 \text{ mm} \quad (29)$$

### n. Ângulo dos chanfros da coroa

O ângulo dos chanfros da coroa é calculado utilizando a equação (30) [24].

$$\delta = \arccos \left( \frac{d_p}{d_e} \right) \quad (30)$$

Onde:  $\delta$  = Ângulo dos chanfros da coroa

Substituindo os valores,

$$\delta = 30,7^\circ \quad (31)$$

Finalmente, pode ser montada a Tabela 10 com todos os dados necessários para o desenho do conjunto de Coroa e Rosca sem-fim.

Tabela 10 – Dados do conjunto Coroa e Rosca sem-fim

Conjunto Sem-fim e Coroa		
Dados primários		
Módulo	M	0,7

Passo	P	2,2 mm
Avanço	Ph	4,4 mm
Distância entre eixos	E	12,7 mm
<b>Ângulos</b>		
Ângulo de Pressão	$\varphi$	20 graus
Ângulo de Flanco do Filete	$\gamma$	40 graus
<b>Dados dos dentes</b>		
Altura cabeça do Dente	a	0,7 mm
Altura pé do dente	b para $\varphi = 20$ graus	0,875 mm
Altura total do dente	h para $\varphi = 20$ graus	1,575 mm
Espessura do Dente (lateral)	s	1,1 mm
<b>Sem Fim</b>		
RPM Sem-fim	Np	120 RPM
Número de entradas	Ne	2 entradas
Diâmetro Externo	de	10 mm
Diâmetro Primitivo	dp	8,6 mm
Ângulo da hélice	$\beta$	9,4 graus
<b>Coroa</b>		
RPM Coroa	Nc	10 RPM
Número de dentes (Coroa)	Z	24 dentes
Diâmetro Externo	De	18,2
Diâmetro Primitivo	Dp	16,8
Largura da Coroa	l	5,6 mm
Raio de contato da coroa	R	3,6 mm
Ângulo dos chanfros	$\delta$	30,7 graus

#### 3.4.4.2. Desenho

Com todas as informações calculadas e especificadas, foi desenhado em *Solidworks* o conjunto Coroa e Rosca sem-fim, Figura 38, Figura 39 e Figura 40. O

motor foi desenhado de maneira simplificada, entretanto suas dimensões foram todas corretamente respeitadas.

Figura 38 – Coroa

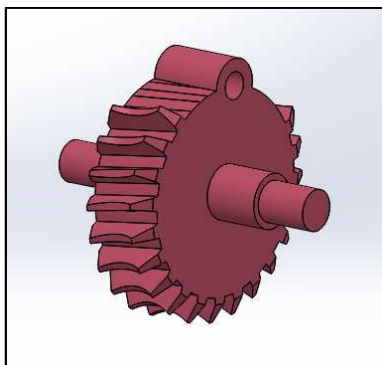


Figura 39 – Rosca sem-fim

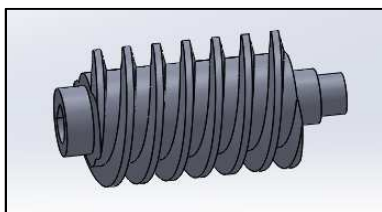
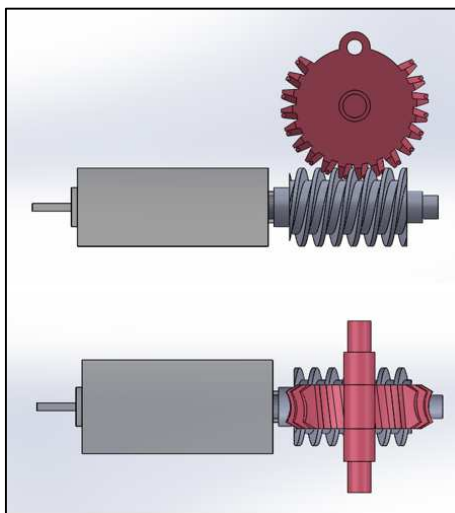


Figura 40 – Vista lateral e superior da montagem Coroa e Rosca sem-fim



### 3.4.5. Design final do dedo

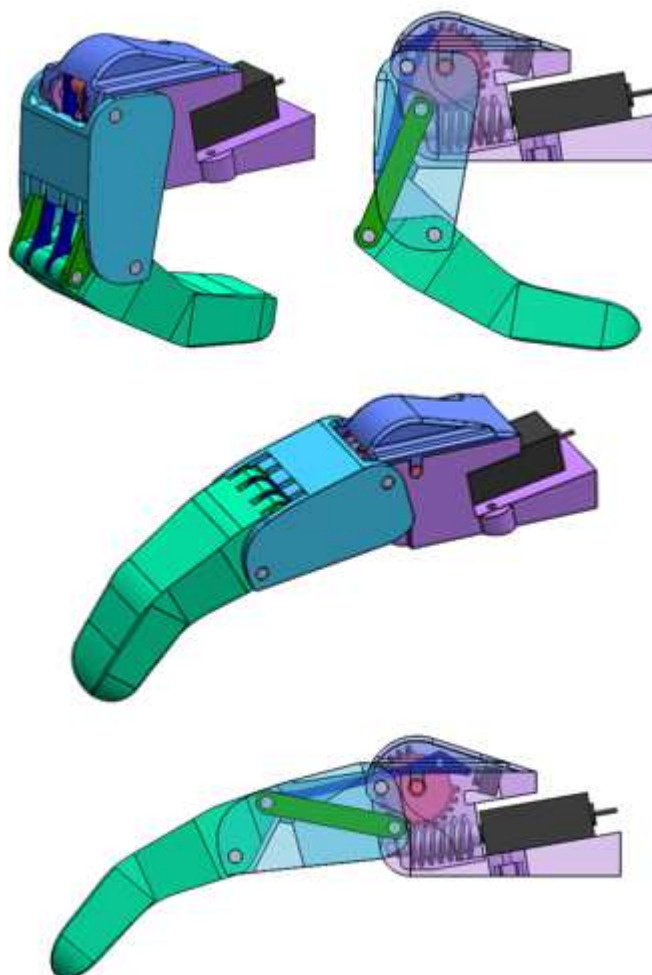
Com todas as informações coletadas e calculadas, foi então possível chegar a um design final em *Solidworks*. A seguir, é exibida tanto a montagem final

do dedo robótico quanto, separadamente, todos os componentes mecânicos que constituem o dedo.

#### 3.4.5.1. *Montagem Final*

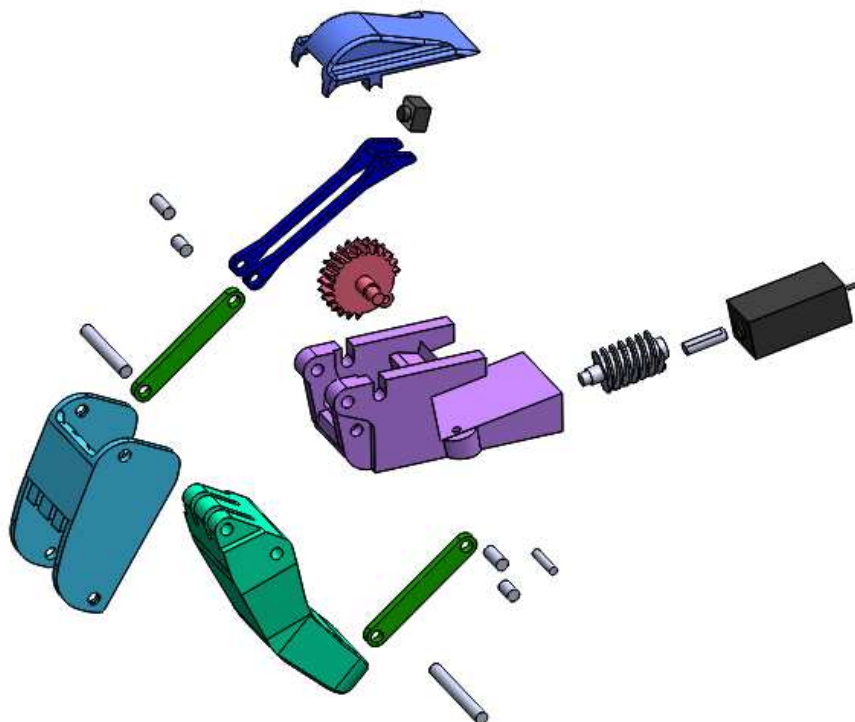
A Figura 41 mostra o design final do dedo em duas situações: na primeira, o dedo recolhido; e, na segunda situação, o dedo aberto. Em ambas as situações é mostrada uma figura em 3D do dedo e outra vista lateral à direita, essa última, com o intuito de que o mecanismo de movimentação possa ser observado.

Figura 41 – Montagem final do dedo robótico



Já, na Figura 42, é exibido o dedo em explosão com todos os seus componentes visíveis. Alguns detalhes e componentes, como parafusos e suas roscas, foram omitidos com a intenção de deixar a representação 3D do dedo visualmente mais simples.

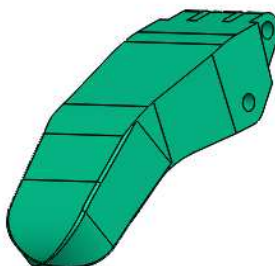
Figura 42 – Vista 3D do dedo em explosão



#### 3.4.5.2. *Falange distal e média*

A Figura 43 apresenta as falanges distal e média que como dito anteriormente foram unidas. As barras de movimentação se acoplam neste componente, assim como a falange proximal.

Figura 43 – Falange distal e média

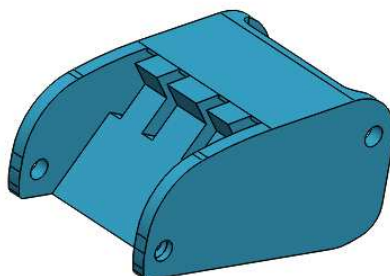


#### 3.4.5.3. *Falange Proximal*

A falange proximal é vista na Figura 44. Esse componente se acopla na base da palma da mão e na falange distal e média. É importante frisar que as barras

de movimentação apenas se apoiam lateralmente neste componente, não existindo nenhuma fixação durante seu movimento.

Figura 44 – Falange Proximal



#### 3.4.5.4. Barras de movimentação e fixação

A Figura 45 mostra a barra de movimentação e de fixação respectivamente. A barra de movimentação é utilizada para transmitir diretamente o movimento mecânico da rosca ao restante do dedo, conectando-se à falange distal e média, além de ter a função de acionar o fim de curso utilizado para calibração. A barra de fixação é utilizada como meio de manter um caminho/direção para a movimentação do dedo.

Figura 45 – Barras de movimentação e fixação

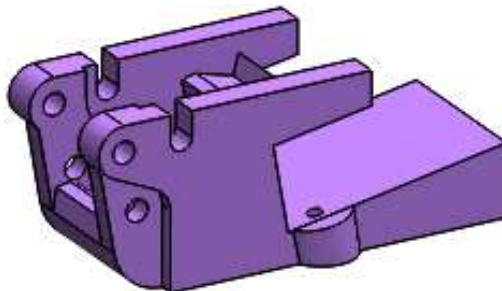


#### 3.4.5.5. Base de fixação para a palma da mão e tampa protetora

Na Figura 46, pode-se observar a base de movimentação do dedo robótico. Essa base tem ligação com todos os componentes do dedo robótico, sendo seu design desenvolvido para que pudesse se encaixar em todos os requisitos de movimento e dimensões dos componentes. A angulação assim como as curvas, também, foram desenhadas com a intenção de não extrapolar as dimensões de uma mão humana.

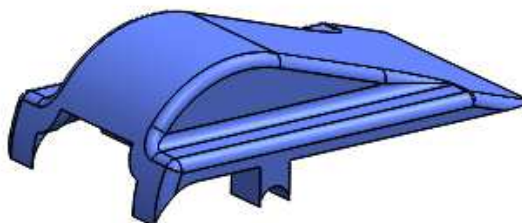


Figura 46 – Base da palma da mão



Já, na Figura 47, é mostrada a tampa protetora, que como seu nome já indica, tem como principal função a proteção do mecanismo de um possível acidente. Outra função desse componente é um melhor visual do dedo. Essa capa lembra a protuberância da articulação metacarpofalângica (articulação existente entre o metacarpo e a falange proximal), trazendo um visual mais humano.

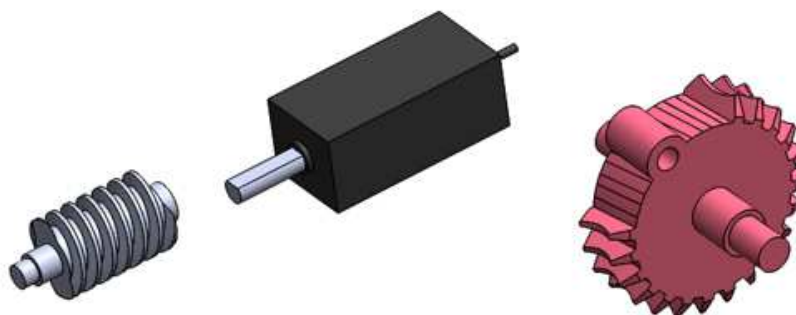
Figura 47 – Tampa protetora



#### 3.4.5.6. *Conjunto Coroa, Sem-fim e Motor*

Como mostrado anteriormente em 3.4.4.2, a Figura 48 representa o conjunto da coroa, sem-fim e do motor.

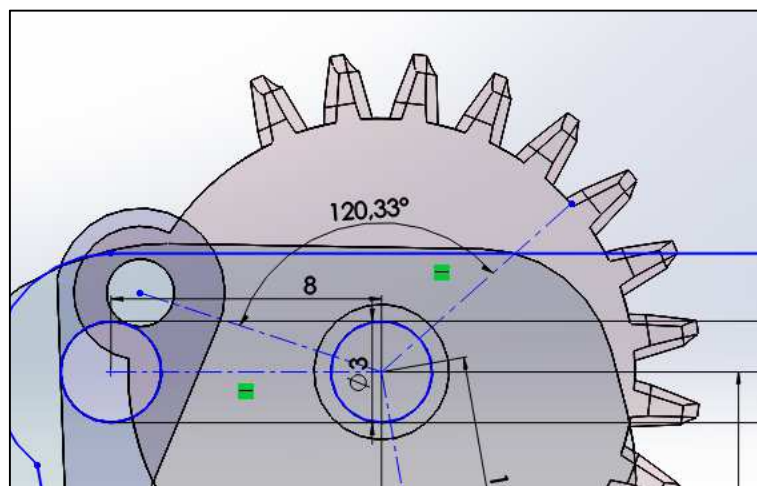
Figura 48 – Conjunto coroa, sem-fim e motor



#### 3.4.5.7. Ângulo de trabalho da rosca

É possível notar também que o ângulo de trabalho da coroa pré-definido foi mantido, assim como o tamanho das estruturas mecânicas. Por meio da Figura 49 é possível confirmar as afirmações.

Figura 49 – Ângulo de trabalho da coroa após desenho final



#### 3.4.6. Cálculos de forças do dedo robótico

Um dado importante e que deve ser levantado são as forças exercidas ao longo do dedo. Esses dados trarão a certeza que o dedo desenvolvido poderá atuar de forma parecida com o dedo humano, cumprindo assim com as requisições.

Deve-se lembrar ainda, que as forças são iguais na abertura e no fechamento do dedo, porém, de sentido oposto. Com isso, não é necessário calcular duas vezes todas as forças.

Na Figura 50, podem ser vistas as forças que serão calculadas no conjunto coroa e rosca sem-fim, e, na Figura 51, a reprodução dessas forças de modo mais claro a fim de uma melhor visualização na hora de se desenvolver os cálculos.

Figura 50 – Forças no conjunto coroa e rosca sem-fim (abertura da mão)

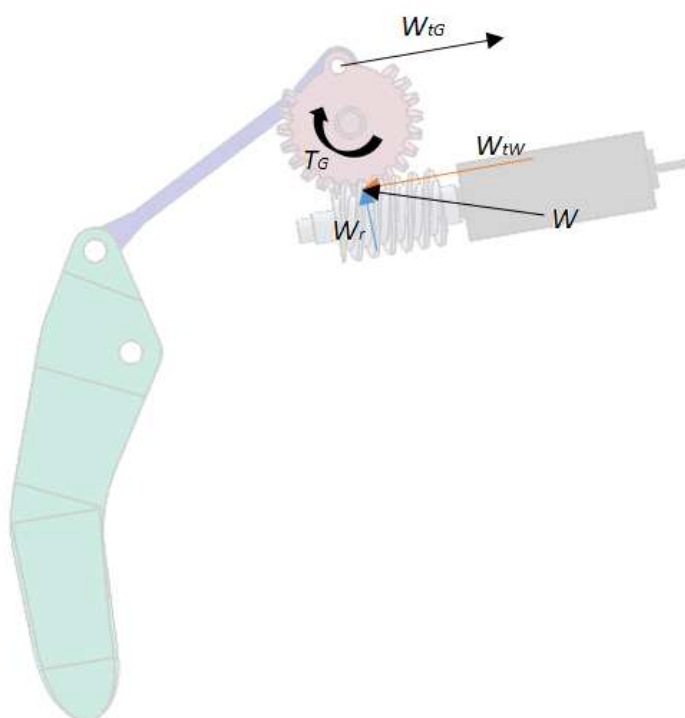
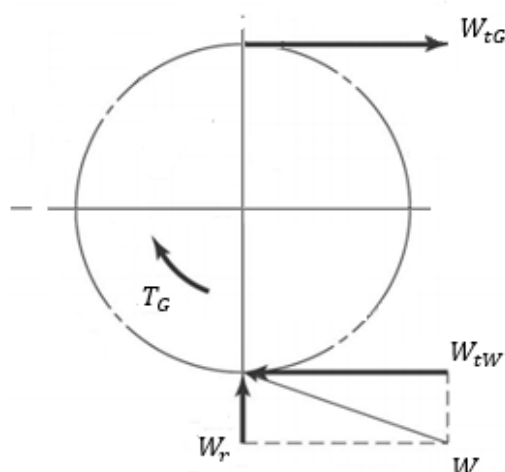


Figura 51 – Diagrama de forças no conjunto coroa e rosca sem-fim simplificado



Na Figura 51, pode-se notar como é feita a distribuição dos componentes de força da rosca, na coroa. Sabendo que os dentes da coroa não têm seus ângulos iguais à  $90^\circ$ , então, a força transmitida pela rosca sem-fim se dará coincidente ao ângulo da hélice ( $\beta$ ) já calculado anteriormente (força radial ( $W_r$ ) não transmite torque).

Com isso, é possível calcular a componente de força tangencial da rosca sem-fim ( $W_{tW}$ ), e assim calcular a componente tangencial de saída da coroa ( $W_{tG}$ ) e o torque exercido pela coroa ( $T_G$ ). Conhecendo essas forças, é possível saber qual é a força e o torque em qualquer ponto de interesse localizado no dedo.

A seguir, será descrito o passo-a-passo para o cálculo das forças.

#### a. Velocidade na linha primitiva:

A equação (31) determina a velocidade na linha primitiva da rosca sem-fim [26].

$$V_w = r_w \cdot \omega_w \quad (31)$$

Onde:  $V_w$  = Velocidade na linha primitiva da rosca sem-fim {m/s}

$r_w$  = raio primitivo da rosca sem-fim {m}

$\omega_w$  = velocidade angular da rosca sem-fim {rad/s}

Como se sabe que a velocidade da rosca sem-fim é de,

$$\omega_w = 120 \text{ RPM} \leftrightarrow 12,566 \text{ rad/s} \quad (32)$$

E o raio primitivo da rosca sem-fim,

$$r_w = 4,3 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (33)$$

Substituindo os valores,

$$V_w = 0,054 \text{ m/s} \quad (34)$$

#### b. Força tangencial da rosca sem-fim:

Sabendo a velocidade primitiva da rosca sem-fim calculada anteriormente, e sabendo que o motor escolhido fornece um torque no eixo de saída ( $T_{\text{eixo de saída, motor}} = 60 \text{ oz-in}$ ).

$$T_{\text{eixo de saída, motor}} = 60 \text{ oz-in} \quad (35)$$

Onde,

$$60 \text{ oz-in} \leftrightarrow 0,423 \text{ Nm} \quad (36)$$

Que pela transformação para Watts a potência ( $H$ ) do eixo de saída do motor é de acordo com a equação (37).

$$H = \frac{T_{\text{eixo de saída, motor}} (\text{Nm}) \cdot 2\pi \cdot 12}{60} = 5,32 \text{ W} \quad (37)$$

Assim utilizando a equação (38) pode-se encontrar a força tangencial da rosca sem-fim [26].

$$W_{tW} = \frac{H}{V_w} \quad (38)$$

Onde:  $W_{tW}$  = força tangencial da rosca sem-fim

Substituindo os valores encontra-se,

$$W_{tW} = 98,52 \text{ N} \quad (39)$$

### c. Força tangencial da coroa $\{W_{tG}\}$ e Torque da coroa $\{T_G\}$ :

Utilizando o ângulo de hélice  $\{\varphi\}$  igual a 9,4 graus, o ângulo de pressão  $\{\beta\}$  igual a 20 graus, e o coeficiente de atrito  $\{f\}$  entre dois plásticos igual a 0,5. Pode-se utilizar a equação (40) para determinar a força tangencial da coroa [26].

$$W_{tG} = W_{tW} \frac{(f \cdot \text{sen } \beta - \cos \varphi \cdot \cos \beta)}{(\cos \varphi \cdot \text{sen } \beta + f \cdot \cos \beta)} \quad (40)$$

Onde:  $W_{tG}$  = Força tangencial da coroa

Substituindo os valores,

$$W_{tG} = -128,83 \text{ N} \quad (41)$$

O seu sinal é negativo pois seu sentido no diagrama de forças é inverso à força tangencial da rosca sem-fim.

Com isso o torque gerado pela coroa pode ser dado pela equação (42) [26].

$$T_G = \frac{W_{tG} \cdot d_p}{2} \quad (42)$$

Substituindo os valores,

$$T_G = 1,082 \text{ Nm} \quad (43)$$

### d. Força na ponta do dedo

Uma outra informação importante, neste projeto é saber qual a força exercida na ponta do dedo robótico quando ele se fecha.

Essa informação foi calculada considerando que a barra que conecta as duas falanges distais e mediais está a uma angulação de aproximadamente  $90^\circ$  em relação à coroa, fazendo com que a força transmitida seja igual à força tangencial da coroa  $W_{tG} = 128,83 \text{ N}$ . Já a força em “B” tem o seu ângulo igual a  $11,82^\circ$ , ângulo entre  $W_{tG}$  e  $W_{tB}$ . Essas considerações foram definidas conforme a posição final de fechamento do dedo utilizada, Figura 52 e Figura 53.

Figura 52 – Diagrama de forças

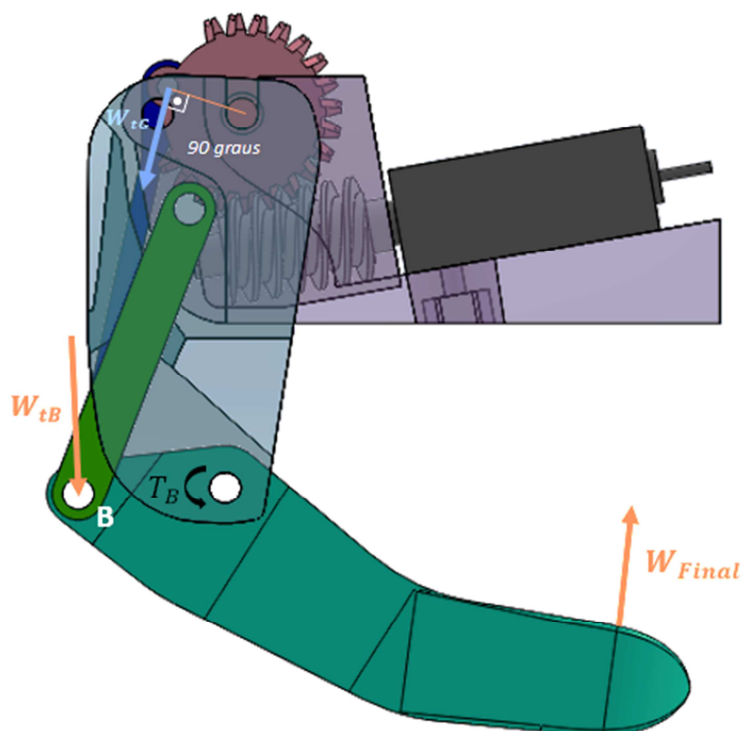
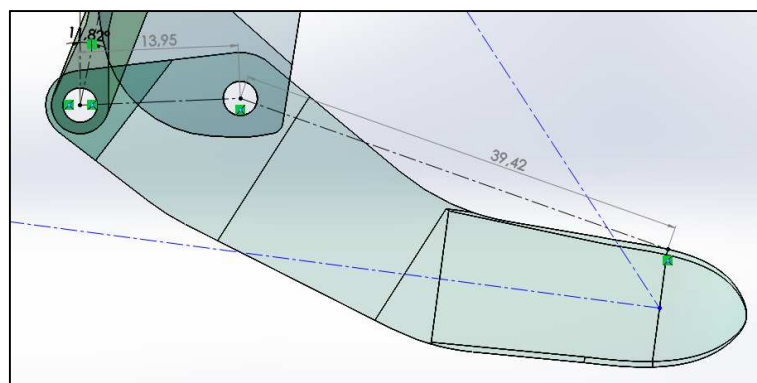


Figura 53 – Valores de distância das forças relevantes



Sendo assim, a força real  $W_{tB}$  é dada pela relação (44).

$$W_{tB} = W_{tB} \cdot \cos 11,82^\circ \quad (44)$$

Que se resume a,

$$W_{tB} = 126,1 \text{ N} \quad (45)$$

Desse modo, sabendo que a distância entre o ponto “B” e o ponto onde é calculado o torque  $T_B$  equivale a 13,95 mm, e que a partir do ponto  $T_B$  até o ponto  $W_{Final}$ , a distância é igual a 39,42 mm, pode-se, a partir da equação (46) realizar os seguintes cálculos:

$$T_B = W_{tB} \cdot 13,95 \cdot 10^{-3} \quad (46)$$

$$T_B = 1,76 \text{ Nm} \quad (47)$$

Logo, a força na ponta do dedo pode ser calculada,

$$W_{Final} = \frac{T_B}{39,42 \cdot 10^{-3}} \quad (48)$$

$$W_{Final} = 44,64 \text{ N} \quad (49)$$

Deve-se enfatizar que os cálculos realizados anteriormente foram simplificados para a situação estática de momento do dedo, não levando em conta outros aspectos como atrito dos eixos de rotação. Outra informação relevante é que a barra verde melhor visualizada na Figura 52, serve apenas como orientação para o movimento do dedo. Portanto, não realiza assim nenhuma força que contribua ou minimize as forças em questão.

Finalmente, pode ser montada a seguinte Tabela 11, com todas as informações encontradas com as equações acima, para poder comparar com os dados de uma mão humana adulta.



Tabela 11 – Dados de forças no dedo

Forças no dedo		
Dados primários		
Velocidade na linha primitiva	$V_w$	0,054 m/s
Potência do motor	$H$	5,32 W
Força tangencial da R. S-F	$W_{tW}$	98,52 N
Força Tangencial da coroa	$W_{tG}$	128,83 N
Torque gerado pela coroa	$T_G$	1,082 Nm
Força tangencial a B	$W_{tB}$	40 graus
Torque no ponto B	$T_B$	1,76 Nm
Força na ponta do dedo	$W_{Final}$	44,64 N

#### 3.4.6.1. Comparação a um dedo humano

Para que as medidas e forças encontradas anteriormente possam ser comparadas e validadas, a dissertação de mestrado *Finger force capability: measurement and prediction using anthropometric and myoelectric measures* apresentada a *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University* pela pesquisadora *Angela DiDomenico Astin*, fez um estudo sobre a força de um dedo humano masculino e feminino para as diversas posições de ação, como por exemplo, para pressionar uma superfície ou utilizar o dedo como gancho.

Os dados da Tabela 12 foram retirados da dissertação citada anteriormente, e mostram a média dos testes realizados pela pesquisadora para cada posição de utilização do dedo [28].

Tabela 12 – Força do dedo humano (Adaptado de [28])

Sexo	Medida	Cutucar	Pressão	Empurrar	Lateral	Pegar	Palmar	Apertar
Ambos	Média(N)	45,95	43,05	60,09	80,93	79,75	54,16	370,671
Masculino	Média(N)	52,58	50,9	70,84	97,02	95,37	62,88	452,44
Feminino	Média(N)	39,31	35,2	49,33	64,84	64,13	45,45	288,91

A posição estudada pela pesquisadora que mais se assemelha com a posição utilizada, nesse trabalho, para os cálculos de força é a posição denominada como “*Pressão*”. Ao analisar o dedo robótico que tem uma força calculada em sua ponta de aproximadamente 45 Newtons, em conjunto da pesquisa citada anteriormente, a qual fornece um valor na ponta do dedo humano de aproximadamente 43 Newtons (média dos testes entre mulheres e homens, Tabela 12), nota-se que os valores são quase semelhantes, havendo uma diferença de apenas (2) dois Newtons a mais de força para o dedo robótico.

Sendo assim, com base na tese da pesquisadora Angela DiDomenico Astin é possível validar e confirmar que o dedo robótico projetado neste trabalho pode sim se equivaler a um dedo humano, pelo menos quando se trata de força exercida. Pois fornece uma quantidade de força equivalente ao dedo humano, quando é utilizado para movimentos de fechar, segurar um objeto ou pressionar uma superfície [28].

#### **3.4.7. Materiais**

O material utilizado na fabricação dos componentes desenvolvidos neste trabalho é o plástico PLA, que será discutido a seguir. Porém, o PLA não é o único material empregado, no dedo robótico que sofrerá esforços mecânicos. Os eixos utilizados na movimentação do dedo, assim como os parafusos e porcas – todos fabricados com aço – também sofrerão esforços como cisalhamento, torção, flexão e compressão. Contudo, como o aço é um material mais resistente e com características mecânicas mais robustas que o PLA, considerou-se que se o PLA conseguir resistir a todos os esforços do projeto, logo, o aço também conseguirá suprir todos esses requisitos.

Não se pode esquecer ainda dos componentes antes citados, como o micromotor, o microcontrolador, e outros, que são construídos por diversos materiais. No entanto, como não são exigidos esforços mecânicos a esses componentes, então, não é necessário um estudo mecânico aprofundado.

Análises de esforços com a utilização do *SolidWorks* é um ponto que poderá ser desenvolvido para um melhor entendimento e definição dos reais esforços aplicados ao dedo robótico, todavia, esse não é o foco principal do trabalho, sendo então uma proposta futura do projeto.

#### 3.4.7.1. PLA

##### 3.4.7.1.1. Composição

O ácido polilático ou também PLA é um termoplástico derivado de fontes como amido de milho, raízes de mandioca ou cana, tornando-o um material biodegradável. Esse material é uma das opções de plástico mais ecologicamente amigável, podendo se degradar em torno de 24 meses quando enterrado, ou em 48 meses, quando em água.[29] Em termos de comparação, o plástico utilizado na fabricação do copo de plástico branco comum, no dia-a-dia demora em torno de 250 a 400 anos para se decompor na natureza.[30]

Outra característica do PLA é que ele possui uma temperatura de transição vítrea,  $T_g$  de  $60^{\circ}\text{C}$ , o que indica que ele começa a perder a sua forma original por volta de  $60^{\circ}\text{C}$ , no entanto, sua temperatura de fusão é de  $180^{\circ}\text{C}$ .[31] A  $T_g$  do PLA seria uma característica ruim caso as peças do dedo tivessem que ser expostas ao sol contínuo durante sua operação. Com isso, o dedo desenvolvido por este trabalho, e, mais posteriormente a mão devem ter sua operação restrita a locais que não tenham suas temperaturas excedendo  $60^{\circ}\text{C}$ , sendo assim, mais indicados para atividades mais precisas e delicadas em ambientes mais frescos.

Uma vantagem da  $T_g$  do PLA é que esse material pode ser impresso com impressora aberta, e, conseqüentemente, diminui os custos sobre o produto final. Além disso, o PLA entre todos os plásticos para impressoras 3D, é o que oferece um dos melhores preços, uma grande facilidade e velocidade de impressão [29][31].

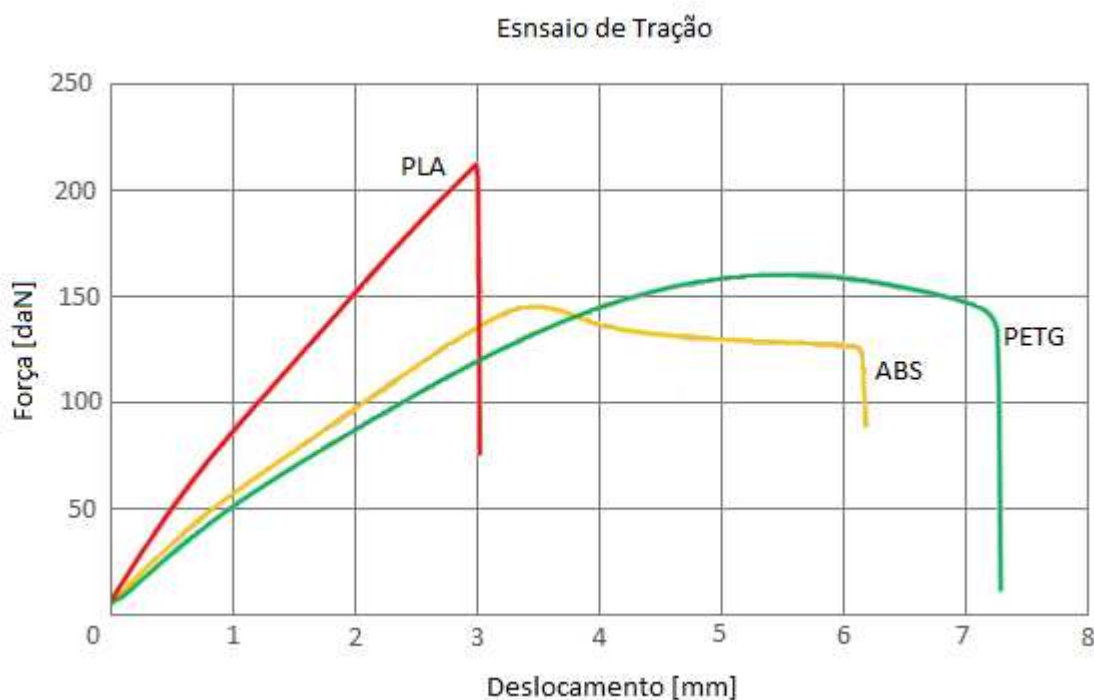
##### 3.4.7.1.2. Características Mecânicas

Mecanicamente o PLA, dentre os materiais para impressão em impressora 3D, é o mais duro superficialmente com 85 Shore D de dureza, capaz de suportar um grande desgaste superficial e atrito. Portanto, trata-se de uma

característica essencial, já que a coroa e a rosca sem-fim vão se movimentar por meio do atrito entre ambas as peças. Essa dureza faz com que o material não seja indicado para peças que necessitem de uma certa flexibilidade, o que não é o caso desse trabalho [29][31].

Na Figura 54, pode ser observado um gráfico retirado do site da 3DLab, que mostra os resultados de um ensaio de tração realizado pela empresa. Neste ensaio, é possível notar que o PLA é o material dentre os 3 testados que suportou a maior carga estática, 215daN, equivalente a aproximadamente 215kgf – mais que o necessário para que o dedo aguarde todos os esforços [31].

Figura 54 – Gráfico de ensaio de tração da empresa 3DLab [31]

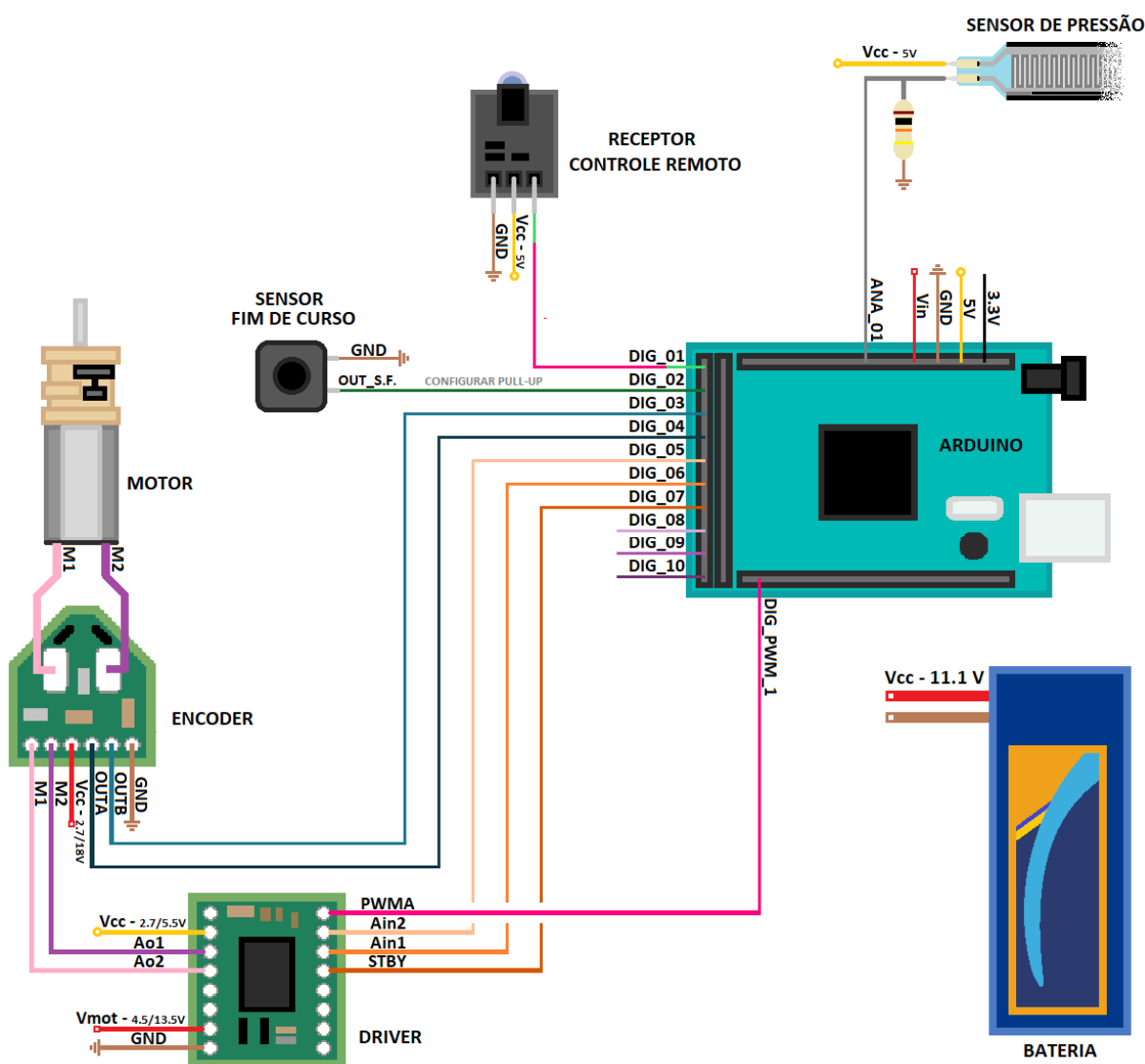


Portanto, devido a todas as características citadas o PLA é o material mais adequado de acordo com as necessidades do projeto, e por isso que ele será empregado em todas as peças a serem produzidas na impressora 3D.

### 3.5. Conexão dos componentes eletrônicos

Os componentes eletrônicos necessários ao desenvolvimento do projeto foram, assim como seus papéis no sistema, citados anteriormente. Com isso, é possível observar na Figura 55 como os componentes deverão ser conectados e alimentados, conforme sua faixa de operação e o tipo de entrada/saída de cada um para que dessa forma o sistema possa funcionar corretamente.

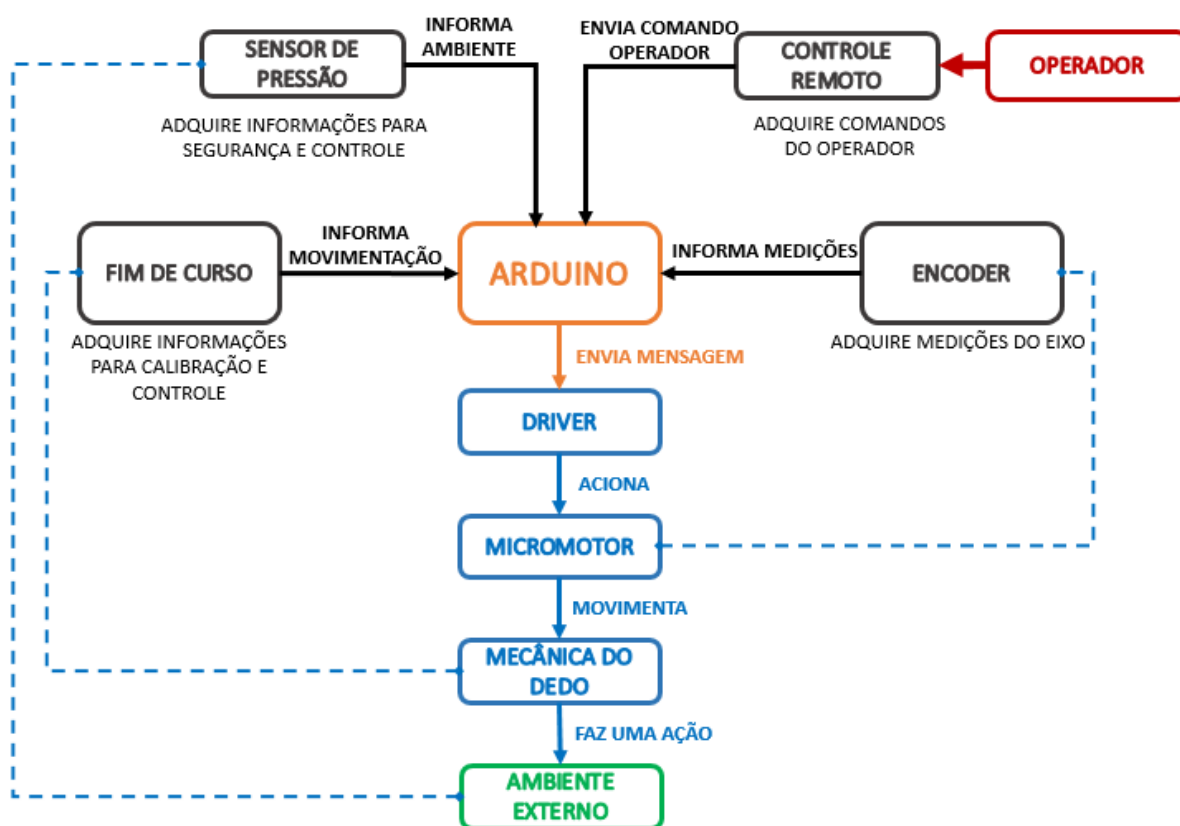
Figura 55 – Conexão dos componentes



### 3.6. Funcionamento do Sistema

Com toda a mecânica calculada e modelada, todos os componentes definidos e conectados, é então possível estabelecer como deverá ser o funcionamento do sistema para que a programação possa ser desenvolvida corretamente. O diagrama de funcionamento e controle do sistema pode ser observado na Figura 56.

Figura 56 – Diagrama de funcionamento do dedo robótico



O funcionamento do diagrama pode ser resumido em algumas etapas:

(1) Primeiramente, o sistema, quando é iniciado deverá fazer a calibração para que a movimentação do dedo seja feita corretamente. Nesta etapa, o operador não tem controle sobre o sistema, sendo necessário que ele espere o sistema ser iniciado completamente e calibrado para conseguir operá-lo.

(2) Após a calibração do sistema, o operador torna-se apto a utilizar a prótese através de comandos realizados pelo controle remoto enviados ao Arduino.

(3) Quando o Arduino receber o comando do operador, o controlador vai verificar as informações do sensor de pressão, do sensor fim de curso e calcular se é possível realizar o comando enviado pelo operador. Por exemplo, se o sensor de pressão ultrapassou a pressão pré-definida como segura, ou o sensor de fim de curso estiver ativado, o sistema não executará o comando enviado pelo operador. Do mesmo modo, se o comando feito pelo operador não estiver dentro da região de operação da prótese, ele não será executado.

(4) O Arduino, ao efetivar que o comando enviado pelo operador poderá ser executado, envia uma mensagem ao *Driver*, que, por sua vez, acionará o Micromotor. Com o micromotor sendo acionado, o mecanismo do dedo será movimentado e executará a ação requisitada.

(5) O *Encoder*, então, enviará constantemente as medições de posição e contagem do micromotor ao Arduino. Ao calcular que o objetivo comandado pelo operador foi alcançado, o Arduino enviará outra mensagem ao *Driver*, que comandará o micromotor a parar.

(6) Se, durante a execução do movimento, o sensor de pressão ou o sensor de fim de curso for acionado, o sistema todo irá parar e duas situações podem ocorrer:

(6.1) Sensor de fim de curso acionado: o sistema foi descalibrado e o sistema retorna ao passo (1) para ser recalibrado.

(6.2) Sensor de pressão indicou uma pressão maior que a máxima definida: o dedo voltará a funcionar somente quando a pressão se tornar menos que a pré-definida e o utilizador vai acionar uma chave de segurança para não causar acidentes.

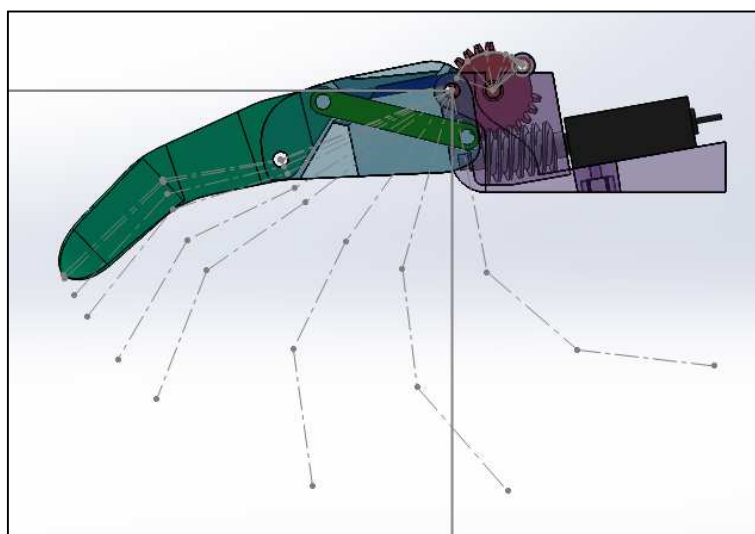
### 3.7. CONTROLE

O controle do sistema é de suma importância para que o Arduino possa distinguir a ordem das ações a serem realizadas, como por exemplo, o acionamento ou a parada dos componentes que constituem o sistema do dedo robótico, fazendo com que o comando passado pelo usuário seja concluído corretamente.

O tipo de controle empregado no projeto é o controle em malha fechada e será explicado melhor no próximo tópico desse trabalho. Esse controle do sistema será desenvolvido levando em consideração o ângulo que a coroa se move e as medições feitas pelo *Encoder* no eixo do micromotor. Desse modo, há uma série de relações fáceis de serem calculadas e que não demandam uma planta complexa para uma boa precisão e previsão do movimento. Tais relações entre a coroa e o micromotor serão discursadas adiante.

Outra possibilidade de controle seria o de posição da ponta do dedo, porém, essa hipótese foi descartada por ser algo que envolve uma grande complexibilidade por conta do movimento não linear do dedo, Figura 57. E, também, por ser algo que não adicionaria ao projeto ganhos elevados de precisão e utilização por meio do operador. Esse tipo de controle seria válido caso o dedo robótico desenvolvido neste trabalho fosse utilizado para tarefas em que a precisão do movimento necessitasse de ser ínfima, como, por exemplo, em procedimentos cirúrgicos.

Figura 57 – Movimentação do dedo de acordo com a angulação da coroa





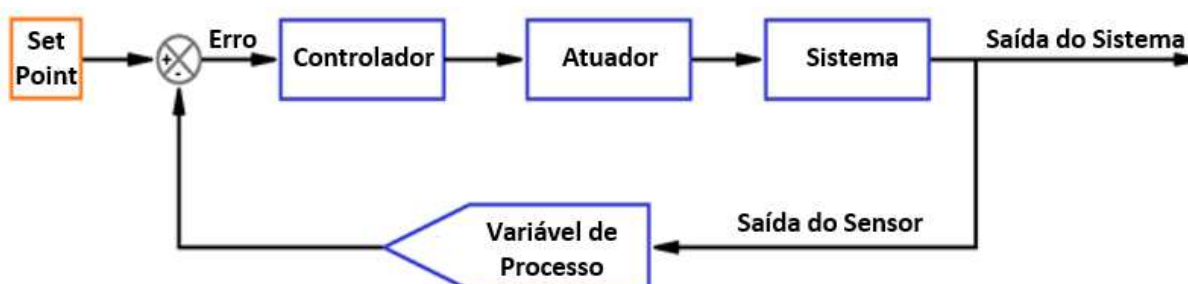
### 3.7.1. Definição de Malha Fechada

O controle em malha fechada se diferencia do controle em malha aberta por existir na malha fechada uma realimentação contínua de dados ao controlador, sendo nomeada malha fechada por conta disso. A transmissão de dados ocorre numa taxa estabelecida pelo programador e a precisão construtiva do sensor ou outro componente utilizado para a aquisição dos dados. Na Figura 58 e na Figura 59, podem ser vistos, respectivamente, os sistemas em malha aberta e malha fechada. [32]

Figura 58 – Sistema de controle em malha aberta (Adaptado de [33])



Figura 59 – Sistema de controle em malha fechada (Adaptado de [33])



### 3.7.2. Funcionamento do controle

De acordo com o diagrama de malha fechada da Figura 59, podem-se estabelecer algumas comparações com o sistema desenvolvido nesse trabalho:

- (1) *Set Point* → é definido pelo sistema a partir da informação passada pelo operador do dedo robótico através do controle remoto.
- (2) *Erro* → é a comparação entre as contagens do *Encoder* (saída do sensor) e o *Set Point* definido pelo usuário. A informação do erro é passada ao Arduino que decidirá como proceder no restante do processo.

(3) Controlador → no sistema do trabalho, o controlador é representado pelo Arduino que realizará os cálculos para o acionamento do atuador;

(4) Atuador → é representado pelo micromotor que movimentará o restante do sistema do dedo;

(5) Sistema → é todo o restante do dedo robótico movimentado pelo micromotor;

(6) Variável de Processo → é representado pelo número de contagens realizado pelo *Encoder* (saída do sensor), que será comparado com o *Set Point*,

(7) Saída do Sistema → é o final do movimento do dedo, ou seja, a angulação final que o dedo chega após a execução do controle.

### 3.7.3. Relação *Encoder* – Angulação da Coroa

Para que o controle seja satisfatório, é necessário saber quantas medições do *Encoder* equivalem a um grau movido na coroa do dedo. Para esse cálculo, é levado em consideração as características do *Encoder*, utilizando o seguinte pensamento:

1 rotação do eixo primário do motor → 12 contagens do *Encoder* →  
 → 250 rotações do eixo primário → 1 rotação do eixo secundário →  
 → 1 rotação do eixo secundário → **250 x 12 = 3000 medições do *Encoder***

Logo, o *Encoder* realiza 3000 medições a cada (1) uma rotação do eixo secundário conectado à rosca sem-fim. Continuando o raciocínio:

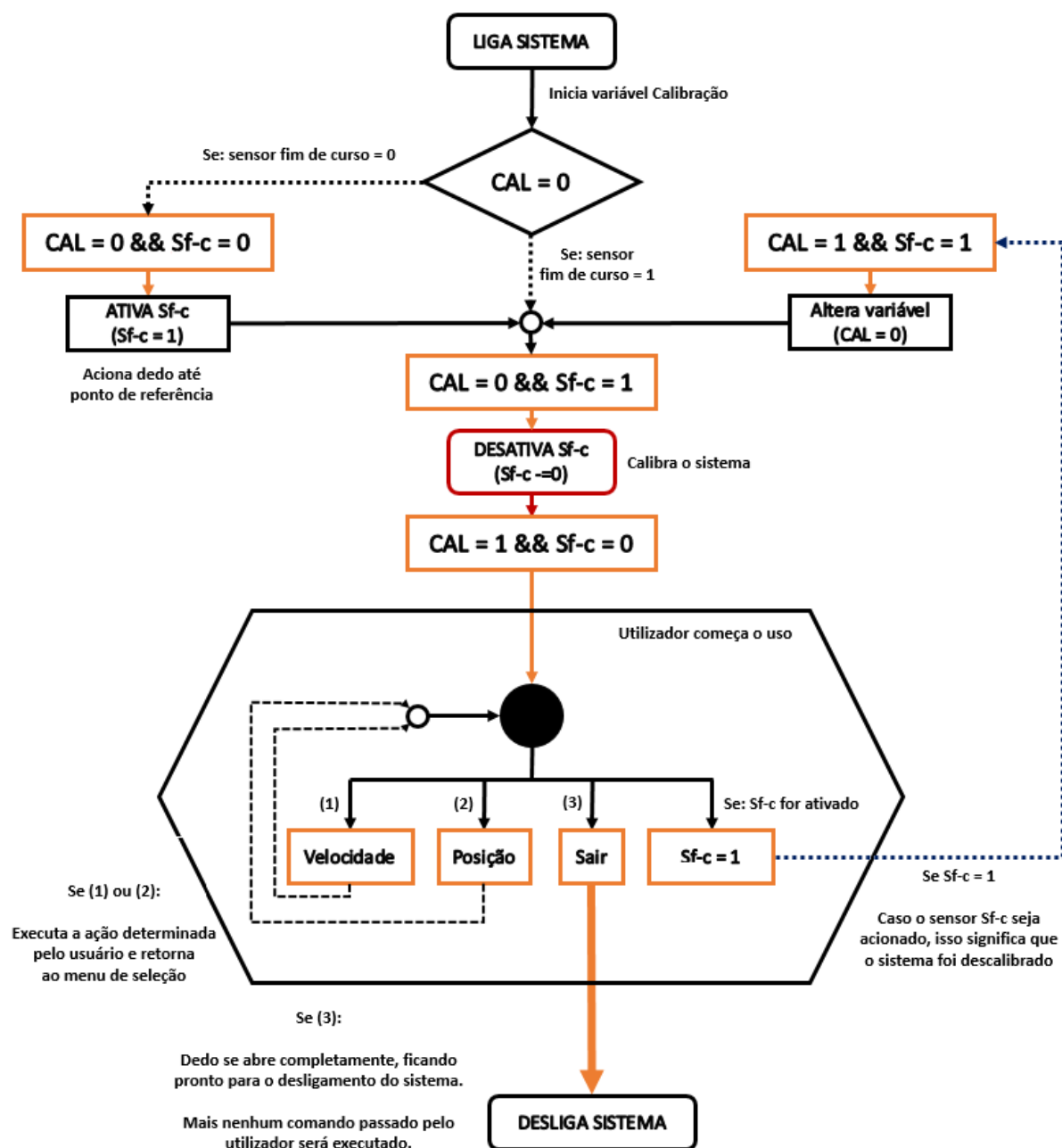
Eixo secundário a 120 RPM → 2 rotações a cada 1 segundo →  
 → Coroa em 2 segundos rotaciona 120 graus → 4 rotações do eixo secundário →  
 → 4 rotações do eixo secundário → **4 x 3000 = 12000 medições do *Encoder*** →  
 → 12000 medições em 120 graus de movimento da coroa →  
 → **12000 / 120 = 100 medições a cada grau de movimento da coroa**

Assim, é possível deduzir que a cada 100 medições do *Encoder*, a coroa se move 1 grau. Essa informação conclui que o controle do dedo será bastante preciso, pois a cada 0,01 grau de movimento da coroa, uma medição no *Encoder* será realizada.

### 3.8. Programação

Com a parte do funcionamento do sistema concluído, deve ser construída a programação dos componentes visando uma boa execução das tarefas endereçadas à prótese. Desse modo, pode-se observar na Figura 60 como deverá ser a programação do sistema.

Figura 60 – Funcionamento da programação do sistema



A explicação do diagrama exposto na Figura 60 é descrito a seguir:

(1) O sistema é iniciado com a variável de calibração denominada “CAL” igual a “0”. Essa variável fornecerá ao sistema a informação que o conjunto do dedo está calibrado (CAL = 1), ou não (CAL = 0).

(2) Se estabelece, inicialmente, que o sistema está descalibrado, desse modo, existem duas opções viáveis a ocorrerem para a calibração do sistema:

(2.1) Caso o sensor de fim de curso não esteja acionado, ou seja,  $Sf-c = 0$ , logo, isso quer dizer que o dedo está numa posição não conhecida pelo sistema. Portanto, é necessário que o dedo se abra, de maneira a acionar o  $Sf-c$  que será o parâmetro de referência da movimentação do dedo, chegando assim no passo (2.2) a seguir.

(2.2) Caso o sensor de fim de curso esteja acionado, ou seja,  $Sf-c = 1$ , o parâmetro de referência foi atingido, e, com isso, segue-se para o próximo passo.

(3) Com a variável  $CAL = 0$  e  $Sf-c = 1$ , o dedo então estabelecerá sua posição inicial da seguinte maneira:

(3.1) O dedo será acionado para se fechar numa velocidade pré-estabelecida, a fim de desativar o sensor fim de curso.

(3.2) Ao desativar o sensor fim de curso ( $Sf-c = 0$ ), o sistema identificará isso com o sinal enviado pelo sensor. E a partir do momento que o sensor for desativado, a coroa deverá girar 1 grau e parar, ou seja, o *Encoder* marcará 100 contagens fazendo com que o motor do dedo pare e termine a calibração ( $CAL = 1$ ).

Com isso, o sistema saberá exatamente a posição do dedo, podendo a partir disso, controlar corretamente todas as ações da prótese.

(4) Com o sistema calibrado, é então possível através de um *menu* de seleção, que o usuário escolha entre 3 opções. No caso de ocorrer algum problema de descalibração da prótese, haverá, então, uma outra ação a ser realizada pelo sistema:

(4.1) Selecionando a opção 1, o usuário poderá escolher qual a velocidade de ação do dedo robótico, e, após ser escolhida a velocidade, o sistema retornará ao menu de seleção.

(4.2) Selecionando a opção 2, o usuário poderá escolher qual a posição/ação que o dedo deverá realizar (com a velocidade pré-definida pelo sistema ou com a velocidade escolhida em 1). Após ser realizada a ação, o sistema retornará ao menu de seleção.

(4.3) Selecionando a opção 3, o usuário informará ao sistema que ele deverá ser desligado. Desse modo, o dedo se abrirá completamente até sua posição inicial e se desligará.

(4.4) Caso, durante a operação do dedo, o sensor de fim de curso for ativo ( $Sf-c = 1$ ), isso indicará que o dedo se descalibrou por algum motivo, sendo necessária sua recalibração. Com isso, a variável CAL é alterada para "0", e, então, retorna ao passo (3).

Observação: O estado (4.4) não é desejado para o projeto, e, por conta disso, têm-se a intenção de evitá-lo quando os cálculos de movimento do dedo forem feitos.

## **4. DISCUSSÃO**

### **4.1. Definições**

O projeto alcançou os resultados já expostos anteriormente, a partir das várias etapas que foram desenvolvidas. Teve início com as primeiras análises teóricas, que envolveram pesquisas a outros trabalhos do gênero, estudos sobre outras próteses comuns e robóticas, e, claro, sobre a própria mão humana. Logo após, partiu-se para estudos mais mecânicos da transmissão de movimento e suas

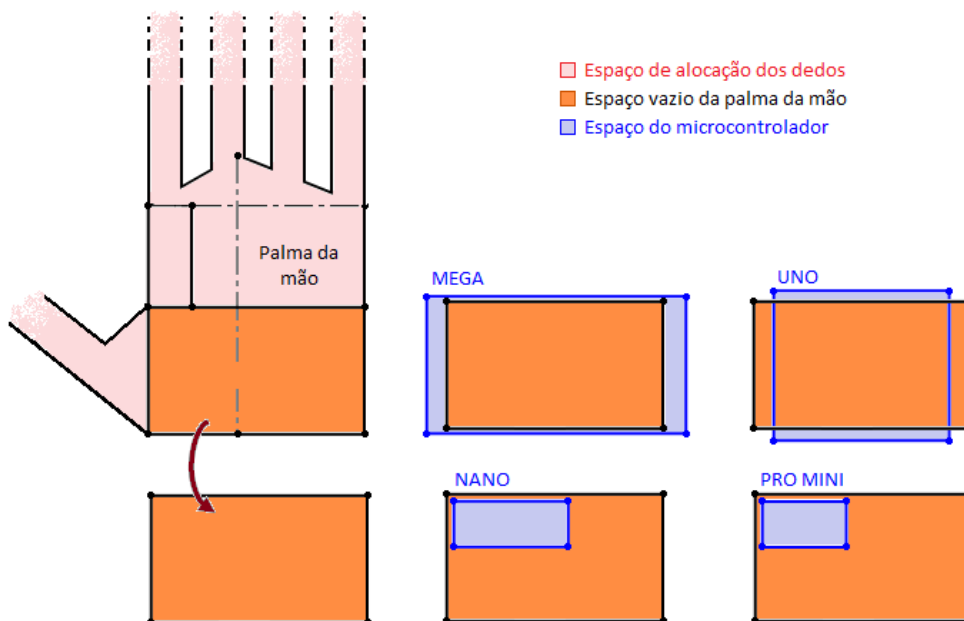
transformações de força, sendo, finalmente possível evoluir para o desenvolvimento bruto, que se caracterizou pelos cálculos e seleção dos componentes, pelas devidas construções e alterações de designs, e a determinação da operação e programação dos processos de funcionamento.

Desse modo, é importante apresentar os três objetivos essenciais estabelecidos nas definições iniciais do projeto:

(a) **Design Humano:** Sobre esse tópico, pode-se concluir que os aspectos físicos, como as dimensões, formato, movimentação do dedo foram pontos consumados durante a elaboração do trabalho. Desse modo, as dimensões podem ser alteradas sem que ocorra uma grande alteração do projeto, conseguindo assim, atender a uma maior gama de pessoas de diferentes estaturas.

Outro ponto estabelecido inicialmente na descrição do **design humano**, foi a necessidade da alocação de todos os componentes na mão. Esse ponto não pôde ser completamente comprovado muito por conta de não existir um design final para a mão com os (5) cinco dedos. Porém, após a realização de um simples esboço, Figura 61, contendo as dimensões dos motores e de alguns modelos de microcontrolador Arduino (como dito em 3.3.4.2 que poderia ocorrer a alteração do microcontrolador de acordo com as dimensões da mão), é possível notar que haverá espaço suficiente para a instalação de alguns modelos de microcontrolador no restante da palma, sem alguma alteração. O microcontrolador Arduino MEGA 2560 escolhido anteriormente, pode até ser utilizado com a condição de que deva ser estudada uma maneira de alocar uma parte sua acima ou abaixo do mecanismo de movimentação do dedo (em vermelho na Figura 61).

Figura 61 – Alocação dos microcontroladores na palma da mão



Portanto, será necessário apenas um compartimento extra no antebraço para a fixação da bateria, claro que seguindo todos os parâmetros de segurança necessários. Ao promover a alocação da maioria dos componentes em sua palma, o futuro design faz com que o projeto consiga abranger diferentes tipos de pessoas, desde aquelas que não possuam grande parte do antebraço, mas também pessoas que possuam a maior parte do antebraço, já que seus mecanismos não ocupam o antebraço, tal como no projeto *InMoov*.

(b) **Acionamento por meio de motores CC:** Como pôde ser notado durante o trabalho, esse ponto foi concluído.

(c) **Utilização de engrenagens e eixos rígidos:** Esse ponto também foi concluído pelo design. Ponto esse que fornece ao projeto uma maior precisão de movimento – ao contrário dos cabos de nylon.

#### 4.2. Custo

O custo é outro resultado alcançado pelo projeto. Ele pode ser melhor observado na Tabela 13, que transparece o custo de um dedo apenas, e, na Tabela 14, que já representa o custo total de uma mão que emprega (5) cinco dedos\*.



É possível observar que o custo total previsto da mão robótica completa é de, aproximadamente, 500 dólares, enquanto o custo do dedo robótico desenvolvido neste trabalho é de, aproximadamente, 200 dólares. Essa discrepância entre uma mão completa e um dedo separado é dada por conta da bateria e do Arduino. São necessários apenas um de cada para o funcionamento, tanto da mão completa, quanto do dedo separado, no entanto para a mão completa, tais valores são diluídos entre o restante do equipamento, tornando mais barata a fabricação de um dedo para a mão completa.

Tabela 13 – Custo de fabricação de um dedo robótico

Custo para um dedo										
Componente	Micromotor	Arduino	Driver	Encoder	Controle Remoto e Receptor	Sensor de Pressão	Fim de Curso	Bateria	PLA	Outros
Quantidade	1	1	1	1	1	1	1	1	1 Kg	-
Preço por unidade (Dólares)	18,95	39	4,95	4,5	4,4	19,95	0,45	43,5	37,7	23
Custo total (Dólares)	196,4									

Tabela 14 – Custo de fabricação para uma mão com cinco dedos robóticos

Custo para uma mão completa com 5 dedos*										
Componente	Micromotor	Arduino	Driver	Encoder	Controle Remoto e Receptor	Sensor de Pressão	Fim de Curso	Bateria	PLA	Outros
Quantidade	6	1	3	6	1	5	5	1	1 Kg	-
Preço por unidade (Dólares)	18,95	39	4,95	4,5	4,4	19,95	0,45	43,5	37,7	115
Custo total (Dólares)	497,15									

\*Observação: É considerado que o polegar utilizará (2) dois motores, por conta do mesmo realizar uma variedade maior de movimentos, necessitando de um emprego maior de motores.

Em relação aos custos descritos anteriormente, foram considerados apenas os custos dos componentes. Ficando de fora, os custos de produção da mão ou dedo, porque não foi efetivada ainda a real produção do sistema. O custo de produção deverá ser adicionado, futuramente para que se possa então comparar o

projeto às demais próteses do mercado. Outro ponto que deve ser observado é que o componente descrito como *outros* é uma estimativa de custo para parafusos, eixos para a movimentação do dedo, fiação, cola, soldas, placa eletrônica para a alocação dos componentes, entre outros componentes.

#### 4.3. Força e outros fatores

Outro ponto a ser lembrado é que a partir das informações do modelo, suas dimensões, do torque exercido pelo motor, das relações de transformação do conjunto coroa e rosca sem-fim, foi possível o cálculo da força exercida na ponta do dedo (45 N) que se aproximou da força encontrada no estudo da mão humana feito por Astin (43 N) [28]. Alguns outros fatores são:

(a) **Simulações computacionais:** a não realização da simulação de resistência do dedo faz com que o projeto não tenha uma total validação da resistência do design sobre os esforços mecânicos, e onde seriam necessários reforços para que a ocorrência de falhas seja mínima. No entanto, o material empregado na prótese (PLA) tem características mecânicas que em teoria suprem, e bem, as necessidades do projeto, sustentando assim, seu emprego.

(b) **Operação por meio de botões:** a necessidade do acionamento de um controle remoto para que o dedo realize suas operações restringe, de certa forma, uma prótese constituída desses dedos. Porém, para uma pessoa que anteriormente não conseguiria realizar determinadas funções como, por exemplo, segurar determinados objetos, deixando assim, sua outra mão livre para realizar ações como mexer no celular, ou, até mesmo, algo mais simples. E esse ganho só pode ser mensurado por quem passa por tais situações.

(c) **O teste prático do dedo não ter ocorrido:** fatores do design físico que poderão ser melhorados, a duração da bateria para as ações do diárias, testes reais de resistência dos componentes, teste da calibração e precisão do sistema, com a utilização do *Encoder*, não puderam ser testados por conta de não ter sido possível a fabricação real do dedo. Essa etapa do projeto é a próxima a ser realizada em trabalhos futuros, pois a parte empírica é de suma importância para que se consiga alinhar a teoria à prática.

## 5. CONCLUSÃO

O trabalho cumpriu com o objetivo de desenvolver um modelo de dedo robótico que contém todas as características positivas observadas nas demais próteses estudadas. Ao mesmo tempo, o projeto propõe uma solução para a diminuição do custo total de produção de uma prótese robótica, com a vantagem de que os fatores que influenciavam, negativamente, o movimento, a força e a manutenção das demais próteses foram eliminados.

Outro fato que reafirma a qualidade do projeto é a tese, já citada anteriormente, da pesquisadora Angela DiDomenico Astin. Ela comprova que o dedo desenvolvido por esse trabalho, fornece uma força equivalente à força média do dedo humano, e esse fato fortalece o objetivo de que, futuramente, esse dedo poderá se tornar apto a ser utilizado como uma prótese, sendo necessária também a união dos fatores de movimentação do dedo, pegada, duração da bateria, entre outros testes para que de fato, algum dia ele seja empregado [7].

Pode-se concluir também, que a diminuição do custo total da prótese promoverá uma maior difusão dessa tecnologia a pessoas que possuam menos recursos, acarretando em diversos benefícios, tais como a assistência promovida diariamente pela prótese, além do fator social que influencia na inclusão ou reinclusão da pessoa deficiente na sociedade, e, claro, restituindo também parte da autoestima que pôde ser abalada por conta da deficiência.

Quando se trata de trabalhos futuros, existem os seguintes pontos que podem ser abordados:

(a) **Um revestimento para a prótese** como uma pele sintética, servirá tanto para a proteção da prótese, quanto para proporcionar uma imagem mais real e atrativa para o utilizador, sendo desse modo, uma forma muito mais agradável para a integração da pessoa ao seu novo membro robótico;

(b) **O desenvolvimento do polegar** é de extremo interesse para que se torne possível a construção de uma mão robótica. O polegar, como já dito nesse trabalho, é um dedo que exerce uma vasta gama de ações, sendo, portanto necessário um estudo mais detalhado para um melhor design;

(c) **A construção da mão robótica completa com cinco dedos** poderá ser realizada facilmente, pois o trabalho aqui construído, fornece uma grande base para a construção de uma mão robótica (com exceção do polegar), que futuramente poderá ser utilizada, quem sabe, por uma pessoa que necessite;

(d) **A incorporação da tecnologia de aquisição de impulsos musculares** é um aprimoramento que eleva o número de aplicações da futura prótese a quase todas as funções de uma mão. Desse modo, não se torna necessário o acionamento da prótese por meio de botões;

(e) **A simulação e testes de esforços mecânicos** são necessária para a comprovação da efetividade dos materiais empregados, deixando o dedo apto a ser utilizado como uma prótese;

(e) **A construção de um modelo real**, como citado anteriormente, proporciona a observação de problemas não percebidos na concepção do projeto, viabiliza uma gama de testes práticos e também abre espaço para o cálculo do custo total de produção do projeto que é um fator predominante.

Finalmente, espera-se que futuramente, a solidez e o conteúdo desse trabalho possam servir de inspiração para mais pesquisas realizadas na área de robótica aplicada às tecnologias assistivas, melhorando, assim, a vida de pessoas com deficiência e, conseqüentemente, auxiliando a sociedade como um todo.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] SARTORETTO, M. L. & BERSCH, R. **TECNOLOGIA ASSISTIVA: O que é tecnologia Assistiva?** Disponível em: <<http://www.assistiva.com.br/tassistiva.html>> Acessado em: 3 de março, 2018.
- [2] BERSCH, R. **INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA ASSISTIVA.** Porto Alegre, 2017. 20 páginas. Disponível em: <[http://www.assistiva.com.br/Introducao\\_Tecnologia\\_Assistiva.pdf](http://www.assistiva.com.br/Introducao_Tecnologia_Assistiva.pdf)> Acessado em: 3 de março, 2018.
- [3] COOK, A.M. & HUSSEY, S.M. **Assistive Technologies: Principles and Practices.** St. Louis: Mosby, 1995. 592 páginas.
- [4] SCHUNK Superior Clamping and Gripping. **SVH: The first ready for series, servo-eletric 5-finger hand.** Disponível em: <[https://schunk.com/us\\_en/gripping-systems/series/svh/](https://schunk.com/us_en/gripping-systems/series/svh/)> Acessado em: 5 de junho, 2015.
- [5] INMOOV website. **Open source 3D painted life-size robot.** Disponível em: <<http://inmoov.fr/>> Acesso: 26 de outubro, 2017.
- [6] BEBIONIC website. **The Hand.** Disponível em: <[http://bebionic.com/the\\_hand](http://bebionic.com/the_hand)> Acesso: 30 de maio, 2017.
- [7] MARKOWITZ, E. **What a \$100,000 Bionic Arm Can Do.** Disponível em: <<http://www.vocativ.com/money/industry/prosthetic-boom-3d-printed-mind-controlled-limbs/index.html>> Acesso: 5 de março, 2018.
- [8] TOUCH bionics. **How the i-limb works.** Disponível em: <<http://www.touchbionics.com/products/how-i-limb-works>> Acesso: 6 de junho, 2017.
- [9] VENTIMIGLIA, P. **Design of a Human Hand Prosthesis.** Degree (Bachelor of Arts) - Faculty of the Worcester Polytechnic Institute, 2012. 74 páginas.
- [10] ROTH, F. **Fraturas de falanges e metacarpos e suas diferenças.** 2016. Disponível em: <<http://feliperoth.com.br/fraturas-de-falanges-e-metacarpos-e-suas-diferencas/>> Acesso: 5 de abril, 2018.
- [11] POLOLU. **Catalog menu.** Disponível em: <<https://www.pololu.com/catalog/menu/>> Acesso: 23 de janeiro, 2018.
- [12] TOSHIBA. **TB6612FNG:Toshiba Bi-CD Integrated Circuit.** 2008. Disponível em: <<https://www.pololu.com/file/0J86/TB6612FNG.pdf>> Acesso: 25 de janeiro, 2018.
- [13] ARDUINO. **ARDUINO MEGA 2560 REV3.** Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>> Acesso: 12 de março, 2018.

- [14] ROBOCORE TECNOLOGIA LTDA. **Arduino Mega 2560 R3 - Made in Italy**. Disponível em: <<https://www.robocore.net/loja/produtos/arduino-mega-2560-r3.html>> Acesso: 12 de março, 2018.
- [15] ELETROGATE. **Arduino Mega 2560 R3 + Cabo USB para Arduino**. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/mega-2560-r3-cabo-usb-para-arduino>> Acesso: 12 de março, 2018.
- [16] BRASÍLIA Modelismo. **WBateria LiPo ZIPPY Flightmax 2200mAh 3s 11,1 45C**. Disponível em: <<http://www.brasiliamodelismo.com.br/loja2/item/Bateria-LiPo-ZIPPY-Flightmax-2200mAh-3S-11%2C1v-45C.html>> Acesso: 4 de junho, 2018
- [17] ELETROGATE. **Controle Remoto Ir + Receptor Ir**. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/control-remoto-ir-receptor-ir>> Acesso: 12 de março, 2018.
- [18] USINAINFO. **Módulo chave fim curso/Sensor de impacto arduino para projetos**. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/outros-modulos-arduino/modulo-chave-fim-curso-sensor-de-impacto-arduino-para-projetos-4618.html>> Acesso: 22 de março, 2018.
- [19] SPARKFUN Start Something. **Momentary Pushbutton Switch**. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/9190>> Acesso: 25 de maio, 2018.
- [20] MASTERWALKER Eletronic Shop. **Arduino - Utilizando o Push Button**. Disponível em: <<http://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/arduino-utilizando-o-push-button/>> Acesso: 25 de maio, 2018.
- [21] MASTERWALKER Eletronic Shop. **Chave Táctil / Push Button 6x6x7 (5 unidades)**. Disponível em: <<https://www.masterwalkershop.com.br/chave-tactil-push-button-6x6x7-5-unidades>> Acesso: 25 de maio, 2018.
- [22] INTERLINK Electronics – Sensor Technologies. **FSR 408 Data Sheet**. Disponível em: <<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/FSR408-Layout2.pdf>> Acesso: 13 de abril, 2018.
- [23] SPARKFUN Start Something. **Force Sensitive Resistor - Long**. Disponível em: <<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/FSR408-Layout2.pdf>> Acesso: 13 de abril, 2018.
- [24] GORDO, N. & FERREIRA, J. **Apostila Elementos de Máquinas - TELECURSO**. [ca. 2000]. 421 páginas.
- [25] BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10. ed. AMGH, 2016. 1096 páginas.

- [26] REMUS, F. B.; GONÇALVES, L. DE L.; RAMOS, T. R. **MECANISMOS: Engrenagens cônicas e par sem-fim**. Trabalho de pesquisa(Mecanismos) - Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2010. 81 páginas.
- [27] THE ENGINEERING TOOLBOX. **Friction nad Friction Coefficients**. Disponível em: <[https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html)> Acesso: 6 de março, 2018.
- [28] ASTIN, A. D. **Finger force capability: measurement and prediction using anthropometric and myoelectric measures**. Thesis (Master of Science in Industrial and Systems Engineering) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1999. 93 páginas.
- [29] IMPRESSÃO 3D Fácil. **Conheça os diferentes tipos de materiais para impressão 3D FDM**. Disponível em: <<http://www.impressao3dfacil.com.br/conheca-os-diferentes-tipos-de-materiais-para-impressao-3d-fdm/>> Acesso: 3 de fevereiro, 2018.
- [30] TOSI, P. H.; SILVA, F. F.; BEDIN, L. S.; LINS, O. **Término do uso de copos plásticos nas refeições da UNICAMP**. Trabalho de pesquisa (Ciências do Ambiente) – UNICAMP. 6 páginas.
- [31] BRIAN. **Dicas e Tutoriais: Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D**. 2017. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>> Acesso: 4 de fevereiro, 2018.
- [32] OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. Pearson, 2010. 824 páginas.
- [33] SILVA, E. L. S. **Construção de um veículo aéreo do tipo quadricóptero para aplicação de técnica de controle de estabilidade**. Juiz de Fora, 2015. 75 páginas. Disponível em: <[http://www.projetozk.com/base\\_p/artigo.htm](http://www.projetozk.com/base_p/artigo.htm)> Acesso: 23 de maio, 2018.

## 7. APÊNDICE

### A. Pseudocódigo de funcionamento do sistema

CR = Controle Remoto

Sf-c = Sensor fim de curso

CAL = Calibração

MOT = Micromotor

    % Sentido Horário → Abre o dedo

    % Sentido Anti-Horário → Fecha o dedo

PWM\_VEL = Velocidade do Micromotor

MEn = Medições do encoder (Leituras positivas para fechar o dedo) (Valores de 12000 a 0)

“g” = Caractere ou botão a ser pressionado pelo operador % Entre aspas

0 = Desativado

1 = Ativado

F(En) é uma função que conta medições do encoder de acordo com o sentido de rotação do motor.

    % Quando o motor gira no sentido horário (Abre) → Contagem vai subtraindo (-)

    % Quando o motor gira no sentido anti-horário (Fecha) → Contagem vai somando (+)

    % F(Em) deve retornar um número de 12000 a 0 (é o ideal)

▶▶▶ Início do Pseudocódigo

▶ Liga botão bateria → Alimenta todo o sistema

▶ Inicia variáveis

**Enquanto1** (CR != “0”)                      % Inicia o funcionamento do sistema

    CR = (Leitura do CR) → Atualiza CR

**Fim**

CAL = “0”

**Enquanto2** (CR != “1”)                      % Desliga Reinicia o sistema

**Se1** (CAL == 0 && Sf-c == 0)              % Sensor sem-fim DESATIVADO

**Imprime** = “Preparando Calibração”

        PWM\_VEL = Baixo (Empiricamente)

        MOT = Sentido Horário (CW)

**Enquanto** (Sf-c != 1)

            Sf-c = (Leitura Sensor fim de curso)

**Fim**

        MOT = Parado (Stop)



```

CR = (Leitura do CR)           % Scanf(CR)
Imprime = "Preparação para Calibração Realizada"

```

**Fim**

```

Se2 (CAL == 0 && Sf-c == 1)           % Sensor fim de curso ATIVADO

```

```

    Imprime = "Realizando Calibração"
    PWM_VEL = Baixo (Empiricamente)
    MOT = Sentido Anti-Horário (CCW)   %Fecha o dedo
    Enquanto (Sf-c != 0)
        Sf-c = (Leitura Sensor fim de curso)

```

**Fim**

```

MEn = 0           % Zera a medição do encoder %% Soma quando fecha
Enquanto (MEn < 100)   % Fecha o dedo 1 grau para ter uma margem de erro
    MEn = F(Em)

```

**Fim**

```

MOT = Parado (Stop)
MEn = 0
CAL = 1

```

```

Imprime = "Calibração Realizada"

```

**Fim**

```

Se3 (CAL == 1 && Sf-c == 0)           % Sensor fim de curso DESATIVADO, Calibração OK

```

```

    Enquanto3 (CR != "1" || Sf-c != 1)

```

```

        Imprime = "Digite qual comando você quer realizar: 1 = Sai, 2= Velocidade, 3 Posição"
        PWM_VEL = 255           %Padrão mais veloz
        Sf-c = (Ler Sensor fim de curso)
        Wait (Esperar pra sempre algum botão do CR ser pressionado)
            CR = (Leitura do CR)

```

```

Switch1 (CR)

```

```

{

```

```

    Case (CR == "1")

```

```

        Imprime = "Saindo do modo de Operação"

```

```

        Break;

```

```

    Case (CR == "2") %Escolhe Velocidade

```

```

        Imprime = "Escolha a Velocidade = 1, 2, 3, 4 ou 5"

```

```

        Wait (Esperar algum botão do CR ser pressionado)

```

```

            CR = (Leitura do CR)

```

```

        Switch2 (CR)

```

```

        {

```

```

            Case (CR == "1")

```

```

                PWM_VEL = 51

```

```

                Imprime = "Velocidade 51"

```

```

                CR = 100

```

```

                Break;

```

```

            Case (CR == "2")

```

```

                PWM_VEL = 102

```

```

        Imprime = "Velocidade 102"
        CR = 100
        Break;
    Case (CR == "3")
        PWM_VEL = 153
        Imprime = "Velocidade 153"
        CR = 100
        Break;
    Case (CR == "4")
        PWM_VEL = 204
        Imprime = "Velocidade 204"
        CR = 100
        Break;
    Case (CR == "5")
        PWM_VEL = 255
        Imprime = "Velocidade 255"
        CR = 100
        Break;
    Default
        PWM_VEL = 255
        Imprime = "Erro, velocidade padrão 255"
        CR = 100
} (Fim do Switch2)
Break (Fim do Case == "2" do Switch1)
Case (CR == "3") %Escolhe a posição do dedo
    Imprime = "Escolha a Posição = 1, 2, 3, 4, 5 ou 6"
    Wait (Esperar 10 segundos algum botão do CR ser pressionado)
        CR = (Leitura do CR)
    Switch3 (CR)
    {
        Case (CR == "1")
            Imprime = "Posição 1 com angulação de 0 graus"
            DfE = MEn - 0
            Se (DfE > 0)
                MOT = (Sentido Horário) %Abre o dedo
                Enquanto (MEn > 0) %notar a precisão (> 10)
                    MEn = F(Em)
                Fim
                MOT = Parar (Stop)
                CR = 100
            Fim
            Senão
                CR = 100
            Break;
        Case (CR == "2")
            Imprime = "Posição 1 com angulação de 24 graus"
            DfE = MEn - 2400 %Diferença do Encoder
            Se (DfE > 0)
                MOT = (Sentido Horário) %Abre o dedo
                Enquanto (MEn > 2400)

```

MEn = F(Em)

**Fim**

MOT = Parar (Stop)

CR = 100

**Fim**

**Se** (DfE < 0)

MOT = (Sentido Anti-Horário) %Fecha o dedo

**Enquanto** (MEn < 2400)

MEn = F(Em)

**Fim**

MOT = Parar (Stop)

CR = 100

**Fim**

**Senão**

CR = 100

**Break;**

**Case** (CR == "3")

Imprime = "Posição 3 com angulação de 68 graus"

**DfE = MEn - 6800** %Diferença do Encoder

**Se** (DfE > 0)

MOT = (Sentido Horário) %Abre o dedo

**Enquanto** (MEn > 6800)

MEn = F(Em)

**Fim**

MOT = Parar (Stop)

CR = 100

**Fim**

**Se** (DfE < 0)

MOT = (Sentido Anti-Horário) %Fecha o dedo

**Enquanto** (MEn < 6800)

MEn = F(Em)

**Fim**

MOT = Parar (Stop)

CR = 100

**Fim**

**Senão**

CR = 100

**Break;**

**Case** (CR == "4")

Imprime = "Posição 4 com angulação de 72 graus"

**DfE = MEn - 7200** %Diferença do Encoder

**Se** (DfE > 0)

MOT = (Sentido Horário) %Abre o dedo

**Enquanto** (MEn > 7200)

MEn = F(Em)

**Fim**

MOT = Parar (Stop)

CR = 100

**Fim**

**Se** (DfE < 0)

MOT = (Sentido Anti-Horário) %Fecha o dedo

**Enquanto** (MEn < 7200)

MEn = F(Em)

**Fim**

MOT = Parar (Stop)

CR = 100

**Fim**

**Senão**

CR = 100

**Break;**

**Case** (CR == "5")

Imprime = "Posição 5 com angulação de 96 graus"

DfE = MEn - 9600 %Diferença do Encoder

**Se** (DfE > 0)

MOT = (Sentido Horário) %Abre o dedo

**Enquanto** (MEn > 9600)

MEn = F(Em)

**Fim**

MOT = Parar (Stop)

CR = 100

**Fim**

**Se** (DfE < 0)

MOT = (Sentido Anti-Horário) %Fecha o dedo

**Enquanto** (MEn < 9600)

MEn = F(Em)

**Fim**

MOT = Parar (Stop)

CR = 100

**Fim**

**Senão**

CR = 100

**Break;**

**Case** (CR == "6")

Imprime = "Posição 6 com angulação de 120 graus"

DfE = MEn - 12000

**Se** (DfE < 0)

MOT = (Sentido Anti-Horário) %Fecha o dedo

**Enquanto** (MEn < 12000) %notar a precisão

MEn = F(Em)

**Fim**

MOT = Parar (Stop)

CR = 100

**Fim**

**Senão**

CR = 100

**Fim**

**Break;**

```

                                Default
                                Imprime = "Erro"
                                CR = 100
                                } (Fim do Switch3)
                                Break; (Fim do Case == "3" do Switch1)
                                Default
                                CR = 100
                                } (Fim do Switch1)
                                Fim (Enquanto3)
                                Fim (Se3)

                                Se4 (CAL == 1 && Sf-c == 1)          % Sensor fim de curso DESATIVADO, Calibração OK
                                CAL = 0;

                                Fim
                                Fim (Enquanto2)
```

