

THIAGO RYUJI KITAMIKADO

**BRAÇO ROBÓTICO PARA
REPRESENTAÇÃO DE LINGUAGEM DE
SINAIS**

São Paulo

2021

THIAGO RYUJI KITAMIKADO

**BRAÇO ROBÓTICO PARA REPRESENTAÇÃO
DE LINGUAGEM DE SINAIS**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Mecatrônica, junto ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos (PMR)

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Cury Ibrahim

São Paulo

2021

Esta monografia é apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Engenharia Mecatrônica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É o produto do nosso próprio trabalho, exceto onde indicado no texto. A monografia pode ser livremente copiada e distribuída desde que a fonte seja citada.

FICHA CATALOGRÁFICA

XXx, XXX; YYY, YYY
BRAÇO ROBÓTICO PARA REPRESENTAÇÃO DE LINGUAGEM DE SINAIS/ XXx,
XXX; YYY, YYY. – São Paulo, 2021-
34 p.

Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de
Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos (PMR), 2021.

1. xxx 2. yyy 3. www I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. De-
partamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. XXX, XXX III.
YYY, YYY

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço primeiro ao Amigos da Poli, sem seu apoio este projeto não teria sido possível de se concretizar.

Também agradeço aos professores Pai Chi Nan e Ricardo Curry Ibrahim que me auxiliaram muito neste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a meus pais, irmão e amigos que me deram muito apoio quando precisei.

RESUMO

O uso de robôs para realização de diversas funções, tanto na indústria quanto em ambientes domésticos, frequentemente exige altos graus de versatilidade e destreza. Entre essas atividades de alta complexidade, podemos citar a reprodução de linguagens de sinais, por isso com o intuito de se reproduzir as letras em linguagem de sinais brasileira (Libras) o presente projeto construiu um braço robótico humanóide, baseado no modelo *open source* Inmoov ([1](#)). Após testes iniciais com um protótipo físico este se mostrou insuficiente para cumprir a atividade proposta. Por isso, foi construído um modelo digital em CAD, que permitiu a implementação de melhorias na versão digital e também uma lógica de programação capaz de reproduzir todas as letras em Libras. Este foi feito através da importação do modelo CAD para o Matlab e, depois, utilizando a ferramenta *Simulink*.

Palavras-chave: Braço Robótico, Braço Humanoide, Libras, linguagem de sinais, Destreza

ABSTRACT

The use of robots for many different functions, both in industrial as well as in domestic contexts, often demands high degrees of versatility and dexterity. Representing sign language, like these other examples, is also a high complexity activity, so the project built a robotic humanoid arm to represent sign language (more specifically, Libras), based on the open source project Inmoov ([1](#)). After the initial tests with the physical prototype, a digital model was built in CAD, allowing the implementation of a program which was capable of reproducing all the letters in Libras. This program was made by importing the CAD model to Matlab and then using the Simulink tool.

Key-words: Humanoid arm, Robotic arm, Libras, Sign Language, Dexterity

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	MÉTODO E MATERIAIS	5
2.1	Materiais	5
2.1.1	Fabricação	5
2.1.2	Análise Mecânica	6
2.2	Método	8
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
3.1	Parte mecânica	10
3.1.1	Flexão dos dedos	10
3.1.2	Pronação do pulso	11
3.1.3	Flexão do braço	12
3.1.4	Pronação do braço	12
3.2	Análise da atividade	12
3.3	Protótipo Inicial	15
3.4	Melhorias	15
3.4.1	Modelo Virtual	15
3.4.2	Protótipo Físico	19
3.5	Integração Matlab e CAD	21
3.6	Modelagem	21
3.7	Simulação	25
4	CONCLUSÕES	31
	REFERÊNCIAS	32

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Numeração dos dedos e do pulso e exemplo de alguns movimentos . . .	7
Figura 2 – Exemplo de outros movimentos	7
Figura 3 – Graus de liberdade do braço	8
Figura 4 – Modelo da mão em CAD	9
Figura 5 – Foto do antebraço com foco nas guias dos tendões	10
Figura 6 – Fotos de separadores dos tendões	11
Figura 7 – Sistema de pronação do pulso	11
Figura 8 – Mecanismo de flexão do braço	12
Figura 9 – Mecanismo de pronação do braço	13
Figura 10 – Letras em libras. Fonte: Site do ResearchGate (2)	13
Figura 11 – Protótipo representando letras em libras, da direita para esquerda e de cima para baixo, a ordem é B, D, C, I, L, O, S, V e W	15
Figura 12 – Peça 1 original	16
Figura 13 – Construção de uma peça do dedo 2	16
Figura 14 – Comparação das peças, a esquerda a original, da direita a reproduzida	17
Figura 15 – Comparação da mão, a esquerda a original, a direita a reproduzida	18
Figura 16 – Peça de ligação entre dedos e mão	18
Figura 17 – Peça de movimentações do pulso	19
Figura 18 – Peça da mão com furos para solenóide	19
Figura 19 – Sugestão de uma junta esférica(3)	20
Figura 20 – Sugestão de adução e abdução nos dedos(3)	20
Figura 21 – Saída do add-in Simscape Multibody	21
Figura 22 – Marcas no protótipo para medição	22
Figura 23 – Medição dos ângulos entre as falanges	22
Figura 24 – Medição do comprimento entre marcações em função do ângulo do motor	24
Figura 25 – Representação em Simulink do sistema inteiro	25
Figura 26 – Lógica de programação em Simulink do sistema	26
Figura 27 – Diagrama para definir posição final	27
Figura 28 – Lógica de programação em Simulink da posição calculada	27
Figura 29 – Lógica de programação em Simulink da posição calculada	27
Figura 30 – Lógica de programação em Simulink da posição calculada	28
Figura 31 – Lógica de programação em Simulink do pulso	28
Figura 32 – Representação da letra em Matlab em ordem alfabética	29
Figura 33 – Gráfico da posição pelo tempo	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peças impressas	6
Tabela 2 – Movimentos necessários para representar letras em Libras	14
Tabela 3 – Medição do primeiro dedo	23
Tabela 4 – Medição do segundo dedo	23
Tabela 5 – Medição do terceiro dedo	23
Tabela 6 – Medição do quarto dedo	23
Tabela 7 – Medição do quinto dedo	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Acrilonitrila butadieno estireno</i>
-----	---

1 INTRODUÇÃO

O termo destreza para uma mão tem algumas definições dependendo da literatura, em uma delas, ela se refere a habilidade de se manusear objetos (4)(5)(6), contudo essa definição não é unânime, e para alguns esta definição é apenas para destreza manipulativa (7). (4) também define de forma matemática, em que uma mão destra é aquela com motores no mínimo igual a quantidade de graus de liberdade, porém outro estudo mostra que pode-se obtê-la utilizando formas alternativas de atuação, por exemplo, por tendões (8). Mas de forma geral, destreza é definida de como a habilidade do manipulador de executar tarefas automaticamente com determinado grau de complexidade (5, pág. 347).

Para a representação de linguagem de sinais, é necessário um certo grau de complexidade da mão e dos braços, como é possível observar com alguns exemplos de braços robóticos que, apesar de considerados estado da arte, não conseguem realizar essa atividade. Em grande parte, a dificuldade de simular a destreza da mão humana se deve à grande quantidade de graus de liberdade e, conseqüentemente, ao alto nível de flexibilidade que esta possui. Porém, para usos mais generalistas, onde o ambiente na qual a mão vai atuar não é completamente conhecido, essa adaptabilidade é essencial. Nos próximos parágrafos serão analisados alguns braços robóticos que servirão como estado da arte para o presente trabalho.

Vários são os usos de um braço robótico, sendo a manipulação de objetos um dos mais comuns. Para isso, a inclusão de sensores em vários casos é essencial e, por isso, robôs como o desenvolvido por Yamano e Maeno(9), onde a mão é controlada por fios e motores ultrasônicos demonstram pesquisas nesse sentido. Neste, a rotação é feita diretamente através desses fios ligados em polias e estas nas falanges e, através do comportamento desses fios (mais especificamente a distorção causada quando o dedo entra em contato com outro objeto), este consegue detectar quando o dedo entra em contato com algum objeto. O projeto possui no fim 20 graus de liberdade e a capacidade de detectar a força de contato. Os graus presentes são flexão/extensão de cada falange dos dedos (2 no dedão e 3 nos outros) além da adução/abdução de cada dedo e a oposição do dedão. Apesar da quantidade consideravelmente grande de graus de liberdade, o projeto ainda não consegue representar todas as letras, faltando ainda a flexão da primeira falange independente das outras falanges.

Expandindo essa necessidade, o protótipo de Hirzinger et al.(10), apesar de relativamente antigo, ainda pode ser considerado relevante projeto ao se tratar de estado de arte. Apresentando 4 dedos com 3 articulações motorizadas e diversos sensores, incluindo de posição, torque e temperatura, ela oferece uma grande variedade de entradas permitindo

que esse sistema faça estimativas mais precisas dos objetos que ele está manipulando. Apesar de uma destreza considerável, este não consegue representar as letras em Libras.

Considerando, contudo, a velocidade de se pegar objetos, podemos destacar o modelo de [Namiki et al.\(11\)](#). Este possui um mini motor em cada falange, permitindo um mecanismo relativamente leve e que, mesmo assim, consegue atingir altas velocidades (chegando até $10\pi \frac{rad}{s}$ na flexão) e com uma força significativa para segurar objetos (aproximadamente 28N na ponta do dedo). O mecanismo possui 3 dedos: 2 dedos e 1 dedo indicador, sendo que o primeiro possui 3 graus de liberdade (flexão e extensão das duas falanges e adução e abdução), e o segundo 2 graus de liberdade (flexão e extensão das duas falanges). O projeto consegue pegar uma bola de borracha enquanto ela cai, porém não consegue replicar a maioria das linguagens de sinais, pois não possui adução/abdução dos dedos.

Procurando exemplos de robôs humanóides para verificar a sua capacidade de replicar linguagem de sinais, temos que considerar seus diversos usos, como o de utilizar estruturas já prontas que são normalmente usadas por pessoas. Um destes é o Robonaut ([2017](#)), um projeto da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em conjunto com a *General Motors*. Este possui funcionalidade de ser controlado remotamente, desta forma, aumentando a necessidade de se aproximar ao humano ([12](#)). A mão deste apresenta um número relativamente elevado de graus de liberdade (15 em cada mão), estes são: (1) flexão de cada falange (3 em cada dedão e 2 no dedão) e (2) oposição do dedão. Com essa grande quantidade de graus de liberdade, o robô possui muita destreza, contudo, por não possuir adução e abdução no indicador, ele não consegue replicar todas as letras em Libras.

Outro importante uso de braços humanóides são próteses. Um desses é a criada por [Controzzi et al.\(13\)](#), que apresenta uma mão e antebraço com quase todos os graus de liberdade dos humanos. Ele possui 20 graus de liberdade na mão, sendo 11 delas atuadas (faltando apenas o adução/abdução no quinto dedo), e o acionamento da maior parte desses graus de liberdade é feita por fios. O projeto possui tanto grande destreza quanto a possibilidade de representar as letras.

Outro exemplo destas próteses, com vários graus de liberdade, é o do *Modular Prosthetic Limb*, que possui os principais movimentos do pulso e da mão (flexão e extensão, desvio ulnar e radial, pronação e supinação do pulso; flexão e extensão, adução e abdução dos dedos). Além disso, o projeto coloca muito esforço para que a prótese tenha grande capacidade de manipular objetos, utilizando um mecanismo com apenas um motor na flexão e extensão que permite um controle maior para segurar objetos ([14](#)). Com essa grande quantidade de graus de liberdade, o robô possui muita destreza, contudo, por não possuir adução e abdução no indicador, ele não consegue replicar todas as letras em Libras.

Também destacamos o projeto Inmoov, feito pelo designer [Langevin\(1\)](#), um dos

primeiros robôs feitos em *open source* e com a maior parte das partes feitas em impressão rápida. A mão, apesar de relativamente simples (apenas possui um grau de liberdade em cada dedo), é relativamente fácil de se reproduzir. Além disso, ele pode ser melhorado, como [Bulgarelli et al.\(3\)](#) fez. Eles construíram melhorias no protótipo, permitindo adução/abdução dos dedos e do pulso, além de flexão/extensão do pulso para reproduzir sinais da língua de sinais italiana. Esses movimentos no pulso foram garantidos através de um sistema de três motores com um mecanismo paralelo e a adução e abdução do pulso e os movimentos no dedo, através de tendões. Porém ainda não consegue representar as letras em Libras.

Por fim, analisando outros projetos com o intuito de se representar linguagens de sinais, notou-se uma pequena quantidade destes. Um deles foi de [Meghdari et al.\(15\)](#) que desenvolveu um robô com um tronco, braços, uma cabeça e rodas como pernas. O robô tem um total de 59 graus de liberdade:

- 1 no tronco (Flexão do abdômen)
- 3 nas pernas
 - 2 rodas
 - 1 de Flexão/Extensão das "pernas"
- 6 por braço
 - Flexão/Extensão do braço
 - Pronação/Supinação do braço
 - Flexão/Extensão do pulso
 - Pronação/Supinação do antebraço
 - Pronação/Supinação do ombro
 - Adução/Abdução do ombro
- 20 em cada mão
 - Flexão/Extensão em cada falange (3 nos dedos indicador, médio, anelar e mínimo e 2 no dedão)
 - Adução/Abdução para cada dedo
 - Oposição do dedão

Ele foi construído para representar a linguagem de sinais persa para auxiliar na educação de crianças com problemas auditivos. Outros projetos com o mesmo intuito utilizaram robôs já prontos para representar a linguagem de sinais, como os de [Kose et](#)

al.(16) e Akalin e Kose(17). Ambos utilizaram o robô NAO, porém devido a quantidade limitada de graus de liberdade, este poderia apenas representar uma quantidade restrita de palavras.

Além de funcionalmente replicar o braço humano, pode-se também tentar fazê-lo na aparência. A semelhança com humanos dependendo da situação tem efeitos positivos e negativos (18) e, dessa forma, sua aplicação deve ser cuidadosamente planejada para evitar que os resultados sejam os opostos do esperado. Estudos como o de Burgoon et al.(19), Auerbach et al.(20) e Novielli, Rosis e Mazzotta(21), mostram os pontos positivos de se manter uma relação mais próxima de uma entre humanos, tornando mais positiva a interação. Além disso Tapus, Tapus e Mataric(22) e Gardiner et al.(23) também demonstra que essas iterações mais positivas melhoram a performance em tratamentos de reabilitação. Para atividades que envolvem objetos reais, como demonstrado por D.Kidd e Breazeal(24), a semelhança com humanos melhora a eficiência das pessoas envolvidas.

Como podemos notar por esse levantamento da literatura, são poucos os estudos que lidam especificamente com a representação de linguagem de sinais e ainda menos com a Linguagem Brasileira de Sinais (Libras). Esta deficiência de conhecimento específico é ainda mais acentuada quando consideramos que os elementos que compõem as linguagens de sinais (*Designator*, *Tabula* e *Signation*, ou seja, o símbolo que a mão realiza, onde esta fica em relação ao resto do corpo e o movimento que esta realiza, respectivamente), segundo a nomenclatura de Landar e Stokoe(25)) diferem significativamente mesmo entre línguas de origem próxima (26).

Considerando-se o estado da arte de braço humanoide, o presente projeto procura utilizar um braço robótico humanóide para representar as letras em Linguagem Brasileira de Sinais (Libras).

2 MÉTODO E MATERIAIS

2.1 Materiais

Inicialmente, é necessária a construção do protótipo que será utilizado para representar as letras. Como um projeto totalmente original de um braço seria impraticável com os recursos disponíveis, decidiu-se escolher um projeto que serviria como base e no qual melhorias poderiam ser implementadas, de acordo com a necessidade.

Com isso, foi decidido utilizar o protótipo criado pelo [Langevin\(1\)](#), pela sua facilidade e rapidez de produção, principalmente por ser *open source* e a grande maioria de suas peças serem fabricadas por prototipagem rápida.

2.1.1 Fabricação

A fabricação seguiu de acordo com o método descrito pelo criador do protótipo (1). As peças foram fabricadas com filamentos de Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) utilizando a impressora *UP BOX* da *Tiertime*. Os detalhes da impressão de cada peça podem ser vistas na tabela 1:

Onde a unidade identifica a qual parte do braço a peça em específico pertence. O *Setup* se divide em duas partes, a primeira é o avanço na altura que a impressora realiza entre cada camada de material e a segunda é a quantidade de material que preenche o *shell* de cada peça. O avanço em z, na prática, define a qualidade da impressão de superfícies verticais, caso a precisão da peça fabricada não seja muito alta, seu valor pode ser modificado para diminuir o tempo de produção. Por outro lado o *fill* define o preenchimento da peça, quanto menor for seu valor, menor o espaçamento dos filamentos internos, ou seja, mais preenchido é a peça. Quando os requerimentos de resistência mecânica da peça não forem críticas, seu valor pode ser aumentado para diminuir o gasto de material e o tempo de produção. A qualidade da impressão determina a qualidade geral do método de produção, como a maior parte das peças não possuem exigências de dimensionamento muito rígidos, seu valor, em geral, é o normal. As últimas duas colunas indicam, respectivamente, o tempo de produção da peça e a quantidade de material gasto.

Antes de cada produção de peça, iniciava-se pré-aquecendo a placa onde esta seria impressa, facilitando sua retirada e evitando perda desta ao se retirar. Com este mesmo intuito, posicionava-se as peças na placa minimizando a produção de material de suporte, normalmente necessário quando havia furos na horizontal, quando isso seria impossível, priorizava-se posições com menor quantidade destes. Desta forma, diminui-se o gasto do

Tabela 1 – Peças impressas

Unidade	Nome	Setup		Qualidade	Tempo	Material
Dedo	FingerIndex	0,2mm	fill 1	Normal	97min	14,2g
	Ringfinger	0,2mm	fill 1	Normal	98min	12,6g
	thumb	0,2mm	fill 2	Normal	144min	24,6g
	Auriculaire	0,2mm	fill 1	Normal	74min	10,3g
	Majeure	0,25mm	fill 2	Normal	76min	17,8g
Mão	coverfinger1	0,2mm	fill 1	Normal	91min	17,2g
	Wristlarge	0,3mm	fill 2	Normal	150min	57,9g
	Wristsmall	0,2mm	fill 1	Normal	132min	26,9g
	Bolt	0,2mm	fill 1	Normal	87min	14g
Antebraço	robpart2	0,3mm	fill 1	Normal	144min	46,5g
	robpart3	0,3mm	fill 2	Normal	95min	34,3g
	robpart4	0,3mm	fill 2	Normal	137min	53,3g
	robpart5	0,4mm	fill 1	Normal	152min	79,6g
Pulso	Rotawrist1	0,3mm	fill 1	Normal	123min	42,7g
	Rotawrist2	0,25mm	fill 1	Normal	75min	24,4g
	Rotawrist3	0,2mm	fill 1	Normal	57min	11,6g
	Cableholder	0,2mm	fill 1	Normal	37min	6,8g
Braços	armtopcover1	0,4mm	fill 2	Normal	105min	49,3g
	armtopcover2	0,4mm	fill 2	Normal	83min	39,6g
	reinforcer	0,2mm	fill 1	Normal	64min	13,5g
	servobase	0,3mm	fill 2	Normal	61min	25,6g
	spacer	0,2mm	fill 1	Normal	38min	8,4g
	elbowshaftgear	0,2mm	fill 1	Normal	87min	19,5g
	rotcenter	0,4mm	fill 1	Normal	148min	83,5g
	servoholder	0,4mm	fill 1	Normal	64min	31,8g

material, o tempo necessário para produção e evita-se o risco de se retirar mais material que o necessário.

O filamento utilizado é o ABS oferecido pela *Tiertime*, chamado *UP fila*, como é o mesmo fornecedor da impressora utilizada, estes supostamente produziram a menor quantidade de problemas, evitando problemas como entupimento do bico ou de performance.

2.1.2 Análise Mecânica

Antes de se explicar os movimentos que o protótipo inicial possuía, será apresentada a notação utilizada durante este trabalho.

Na figura 1, numera-se cada dedo de 1 a 5, sendo 1 o dedão e o 5 o mínimo, e o pulso é numerado 6. Além disso, é possível observar os movimentos mais comuns: adução e abdução (flechas vermelha e violeta da figura 1, que será nomeado A), flexão e extensão

(flecha vermelha da figura 2 e movimento realizado pelos dedos na mesma figura, nomeado F) e pronação e supinação (flecha verde da figura 1, nomeado P).

Cada dedo é dividido em três falanges, nomeados proximal, média e distal, sendo que a proximal é a mais próxima da base do dedo e a distal a mais distante da base. Na figura 2, o dedo 2 está apenas realizando a flexão da falange proximal (que será nomeado Fi).



Figura 1 – Numeração dos dedos e do pulso e exemplo de alguns movimentos



Figura 2 – Exemplo de outros movimentos

Utilizando-se dessa notação, o protótipo inicial possui os seguintes graus de liberdade na mão: flexão / extensão dos dedos (1F, 2F, 3F, 4F e 5F) e pronação / supinação do pulso (6P).

Além destes, a figura 3 apresenta os dois outros graus de liberdade, o de flexão e pronação do braço.

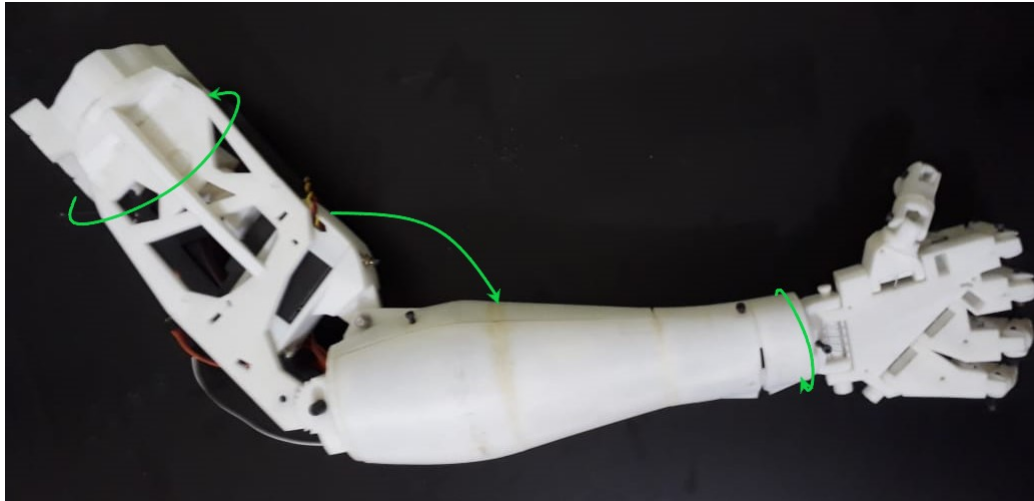


Figura 3 – Graus de liberdade do braço

2.2 Método

Com o protótipo escolhido, uma análise deste para determinar a necessidade de modificações foi realizada. O projeto original oferece abertamente os arquivos em stl, que permitem sua construção, contudo, qualquer manipulação e análise com esse formato se torna extremamente trabalhoso e, algumas vezes, com resultados pouco confiáveis. Por isso, foram feitas tentativas de obter os arquivos originais, contactando o autor original, porém sem sucesso.

Assim, apesar das eventuais incongruências que este processo pode acarretar, foi necessário reconstruir as peças manualmente dos arquivos stl no CAD, optando-se por priorizar as suas dimensões e formato (ou seja, posicionamento de cada característica da peça). Depois da montagem individual de cada peça, um modelo completo foi criado, determinando-se os acoplamentos presentes entre cada peça. Os resultados da conversão estão representados na figura 4.

Após isso, foi feita uma análise da atividade, verificando-se os movimentos necessários para representar as letras. Consultando-se a literatura em busca de uma notação conveniente para os objetivos desse trabalho revelaram possíveis métodos. Estes, contudo, apesar de detalhistas e adequados para linguístas, seriam insuficientes para projetar o sistema que simularia-o, por isso, outra representação foi utilizada para o planejamento desta lógica de programação.

Notando-se a necessidade de se melhorar o protótipo, foram implementadas modificações para incluir esses movimentos no modelo virtual. Concomitantemente, determinou-

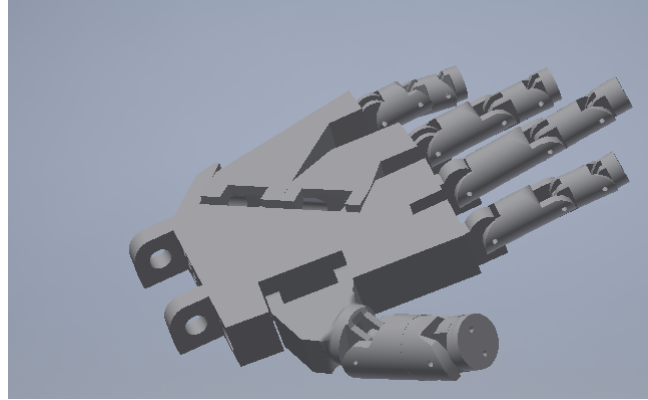


Figura 4 – Modelo da mão em CAD

se o comportamento do sistema, medindo-se como este se comportava com a variação do ângulo do motor. Com o sistema virtual e o modelo do comportamento do sistema prontos, com auxílio do *add-in Simscape Multibody*, foi possível implementar uma lógica de programação que permitiu o modelo de replicar o comportamento do sistema e representar as letras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Parte mecânica

Como já citado, os movimentos deste protótipo são: 1F, 2F, 3F, 4F, 5F (flexão de cada dedo), 6P (pronação do pulso) e 6F (flexão do pulso), além de F e P do braço. O mecanismo do projeto inicial para cada um destes movimentos será explicado nas próximas sessões.

3.1.1 Flexão dos dedos

O sistema de flexão dos dedos é realizado através de motores localizados no antebraço, como é visível na figura 5. A transmissão de força é feita por tendões de polietileno fixados nos servomotores e nas pontas dos dedos, sendo que cada dedo possui dois destes, um para realizar o movimento de flexão (na parte ventral do dedo) e outro para a extensão (na parte dorsal).

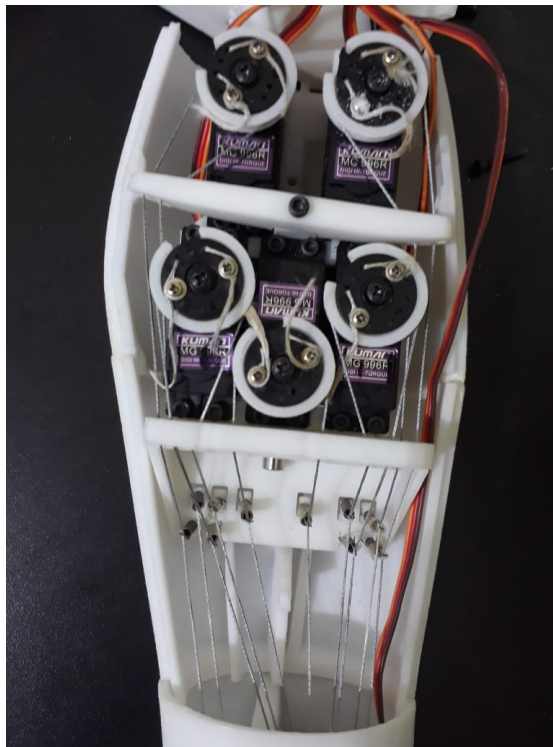


Figura 5 – Foto do antebraço com foco nas guias dos tendões

Entre o antebraço e os dedos, diversas peças fazem a separação dos tendões, impedindo que um interfira no movimento do outro, alguns exemplos podem ser visto na figura 6

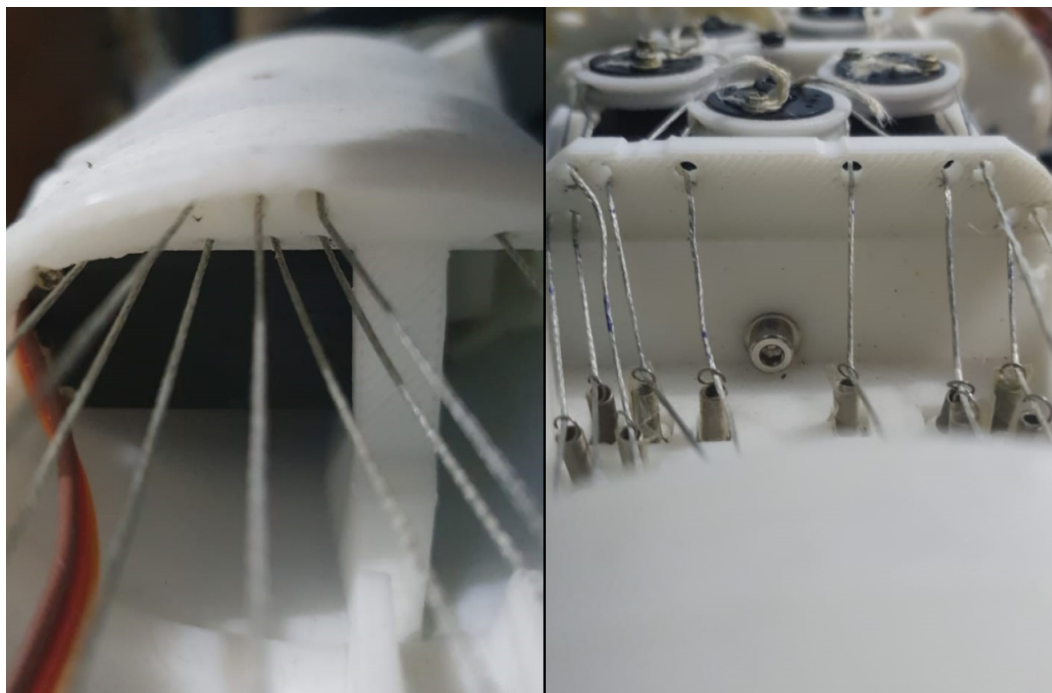


Figura 6 – Fotos de separadores dos tendões

3.1.2 Pronação do pulso

A pronação e a supinação do pulso é realizada através de um conjunto de engrenagens conectadas diretamente com o motor. Na figura 7, é possível observar este conjunto.

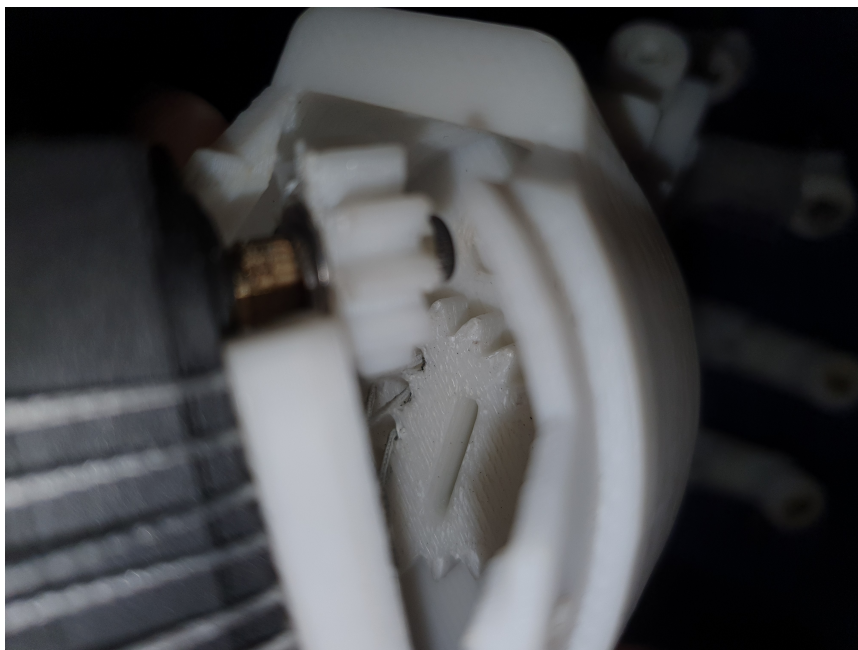


Figura 7 – Sistema de pronação do pulso

Este sistema causa flexão e extensão dos dedos, já que os fios passam dentro da peça indicada na figura 7. Para diminuir este efeito, o protótipo possui um conjunto de

molares que não permite esse movimento, fazendo com que os tendões se mantenham sempre tensionados.

3.1.3 Flexão do braço

O sistema de flexão de braço é composto por um fuso e uma porca (par representado na figura 8 pela linha azul) que fazem o movimento linear. Esse movimento é convertido em movimento de rotação, em torno do eixo verde da figura 8.

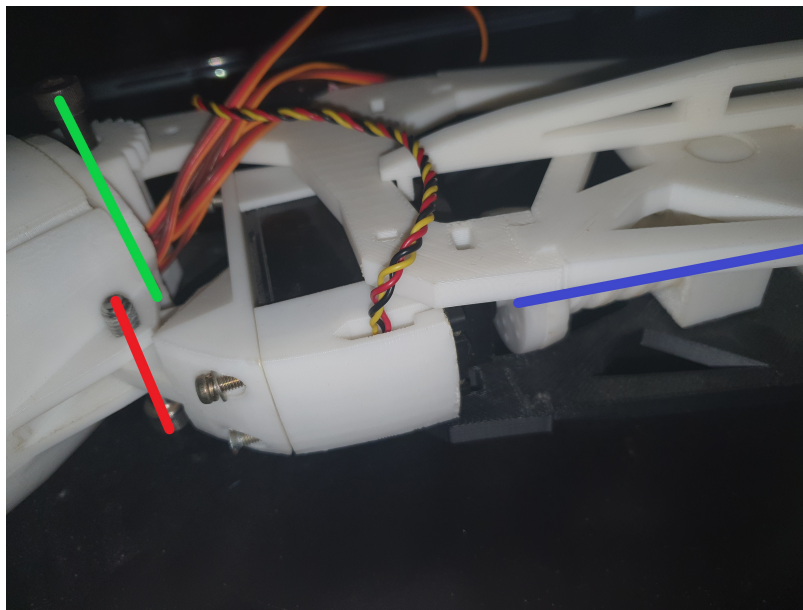


Figura 8 – Mecanismo de flexão do braço

3.1.4 Pronação do braço

A pronação e a supinação do pulso é realizada através de um parafuso rosca sem fim que rotaciona uma engrenagem (partes verde e vermelhas respectivamente da figura 9).

3.2 Análise da atividade

Para se determinar quais os movimentos necessários, procurou-se os métodos de avaliação da configuração da mão para cada uma das letras. Anteriormente esse método era simplesmente visual, como descrito por Landar e Stokoe(25), contudo, ela não é precisa o suficiente para se criar uma lógica de programação para se replicar de forma confiável as configurações. Mais recentemente, outros estudos apresentaram formas mais precisas de se representá-las. Elas funcionam descrevendo a posição de cada falange de cada um dos dedos e especialmente para o dedo 1, se este possui algum ponto de contato com os outros dedos (27)(28).

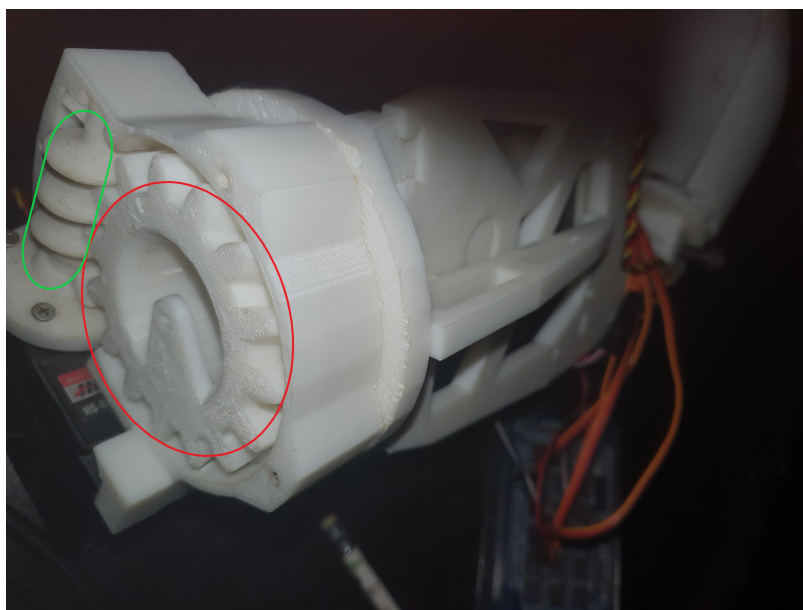


Figura 9 – Mecanismo de pronação do braço

Apesar de extremamente detalhado, essa notação não seria conveniente para o projeto atual, pois ainda seria necessária a conversão da notação adotada para o real comando que deveriam ser colocados para cada motor. Desta forma, foi criada uma maneira alternativa de se representar cada uma das letras.



Figura 10 – Letras em libras. Fonte: Site do ResearchGate (2)

Assim, observando as letras representadas na figura 10, foi montada a tabela 2. Esta foi criada com o intuito tanto de orientar a lógica de simulação dos movimentos quanto para indicar os movimentos que o protótipo necessita para completar a tarefa planejada.

Tabela 2 – Movimentos necessários para representar letras em Libras

Dedo	1º	2º	3º	4º	5º	Pulso	Ordem movimentos	Ângulo
A	F	F	F	F	F		2;3;4;5;1	1;1;1;1;1
B	F						1	1
C	F	F	F	F	F		1;2;3;4;5	0,75;0,25;0,25;0,25;0,25
D	F		F	F	F		1;3;4;5	0,5;0,5;0,5;0,5
E	F	Fi	Fi	Fi	Fi		1;2;3;4;5	0,75;1;1;1;1
F	F	Fi					2;1	0,5;0,75
G	A		F	F	F		1;3;4;5	1;1;1;1
H	FA		A	F	F	P	4;5;1A;1F;6	1;1;1;0,5;0,5
I	F	F	F	F			1;2;3;4	1;1;1;1
J	F	F	F	F		FP	1;2;3;4;6F;6P	1;1;1;1;1;1
K	FA		A	F	A	A	4;5;6;1F;1A;6	1;1;1;0,5;1;0
L			F	F	F		3;4;5	1;1;1
M	F				F	F	6;1;5	1;1;1
N	F			F	F	F	6;1;4;5	1;1;1;1
O	F	F	F	F	F		1;2;3;4;5	0,5;0,5;0,5;0,5;0,5
P	FA		A	F	F	A	4;5;6;1F;1A	1;1;1;0,5;1
Q	A		F	F	F	F	3;4;5;6;1	1;1;1;1;1
R	F		A	F	F		4;5;1;3	1;1;1;1
S	F	F	F	F	F		2;3;4;5;1	1;1;1;1;1
T	F	Fi					1;2	1;1
U	F			F	F		4;5;1	1;1;1
V	F	A		F	F		4;5;1;2	1;1;1;1
W	F				F		5;1	1;1
X	F	Fi	F	F	F	A	3;4;5;1;2;6	1;1;1;1;1;1
Y		F	F	F		F	6;2;3;4;6	1;1;1;1;0
Z	F	A	F	F		FA	2;3;4;5;1;6F;6A;6F;6A;6A	1;1;1;1;1;0,75;-1;1;1;0

Onde o movimento de cada dedo e do pulso são representados nas primeiras colunas, a ordem dos movimentos é dada na penúltima coluna e os ângulos de cada movimento são listados na última coluna, sendo normalizados para facilitar a representação.

Por exemplo, analisando a letra J, para se representá-lo, é necessário que os dedos 1, 2, 3 e 4 sejam completamente flexionados, portanto, na coluna *Ordem movimentos* eles estão marcados com 1 na coluna *Ângulo*. Após isso, a mão precisa realizar o movimento de flexão e supinação (apresentadas como 6F e 6P respectivamente) e como eles precisam realizar o movimento até o fim do curso, também estão com 1 na última coluna.

Como alguns destes movimentos estão ausentes no braço robótico original, fazem-se necessárias adaptações no projeto para a atividade proposta.

3.3 Protótipo Inicial

Com o protótipo inicialmente construído, foi possível representar algumas das letras, implementando um simples programa que, de acordo com a entrada (letra desejada), retorna os ângulos que cada motor rotacionará para obter a posição desejada. Este programa funciona utilizando a função case switch e, seguindo a tabela 2, foi possível representar as letras B, C, D, I, L, O, S, V e W. Desta forma, foram obtidos vídeos do protótipo representando cada uma dessas letras. Os vídeos se encontram [aqui](#). A figura 11 mostra o protótipo representando as letras que este inicialmente consegue realizar.

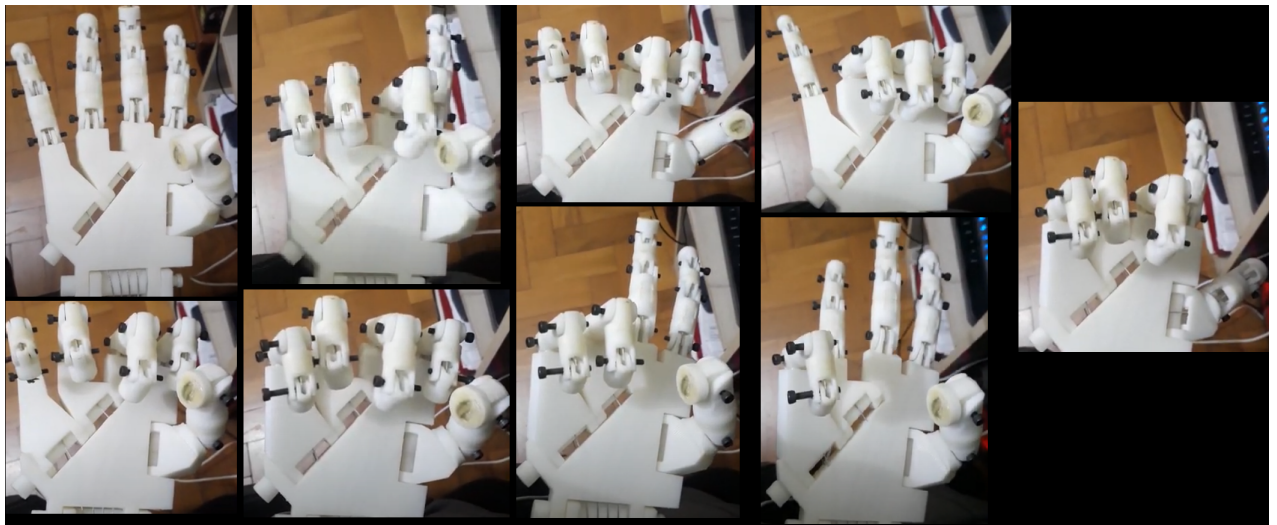


Figura 11 – Protótipo representando letras em libras, da direita para esquerda e de cima para baixo, a ordem é B, D, C, I, L, O, S, V e W

O restante das letras não foi possível se replicar devido a falta de graus de liberdade, no caso do H, por exemplo, o dedo 3 não possui adução/abdução. Desta forma, seria necessário implementar melhorias no modelo original.

3.4 Melhorias

3.4.1 Modelo Virtual

Para representar as outras letras, um modelo em CAD do sistema foi criado, possibilitando implementar modificações no projeto original que permitiriam representar as outras letras. Com o intuito de evitar criar o sistema do começo, tentou-se entrar em contato com o criador original, contudo, sem nenhuma resposta, o processo de recriação foi iniciado.

Assim, utilizando o Autodesk Inventor, as peças foram uma a uma sendo refeitas. Todas as partes foram feitas utilizando um arquivo inicial padrão com medidas em mm. Abaixo serão explicadas a reconstrução de algumas partes com o intuito de mostrar a metodologia usada.

Começando por uma que faz parte dos dedos, representada na figura 12

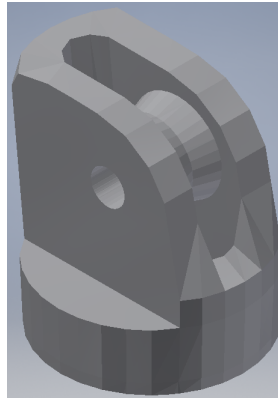


Figura 12 – Peça 1 original

Assim, começando com o formato geral desta, um cilindro foi construído através de um esboço que foi extrudado (figura 13 (a)). Com esse cilindro, foi feito um corte na peça, através da replicação da vista frontal da peça (13 (b)) e extrudando-a. Considerando apenas a intersecção deste novo sólido com o cilindro, obteve-se o resultado desejado (figura 13 (c)). Depois, o furo na parte inferior e na parte frontal foram construídos, utilizando o mesmo método para criar o (b) (figura 13 (d) e (e)). Após essa etapa, foi feita a parte interior da peça, com a criação de um cilindro, como feita no (a), porém no lugar de intersecção ou subtração, foi adicionado esse novo cilindro ao sólido original. Da mesma forma que os furos nos passos (d) e (e), um outro foi feito, como pode ser visto em 13 (g). Por fim, com a vista lateral da peça, análogo ao passo (c), conclui-se o processo (figura 13 (h)).

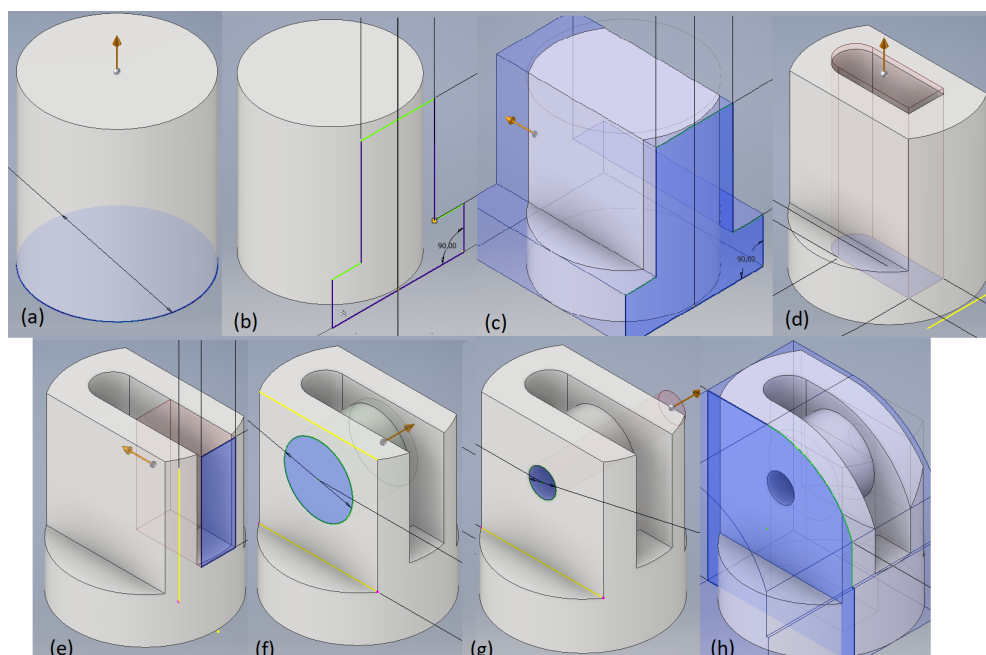


Figura 13 – Construção de uma peça do dedo 2

Após todos esses passos, pode-se observar as peças lado a lado representadas na figura 14:

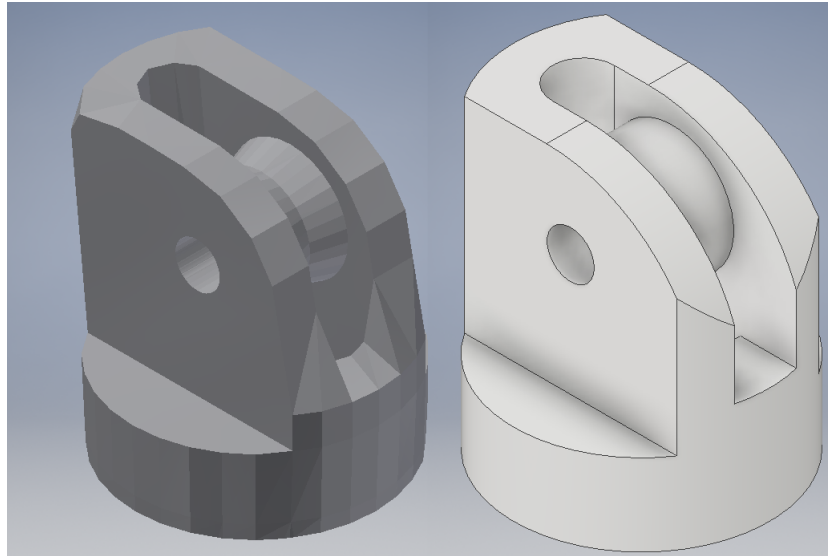


Figura 14 – Comparação das peças, a esquerda a original, da direita a reproduzida

Depois da construção das peças, foi feito um *Assembly*, ou seja, um arquivo que define todas as relações entre as peças de um sistema. Para a interligação entre as várias peças que compõem os dedos, utilizou-se a junta de rotação, já que este permite a definição de um ângulo mais preciso entre as peças e pode ser editada para não permitir alteração de ângulo, inclusive no Simscape Multibody, assim partes que deveriam ser fixas podem ter seus ângulos definidos e nas juntas onde há movimento relativo entre as peças, esses ângulos não são fixados para se replicar o comportamento desejado. Da mesma forma, para ligação entre os dedos e a mão, foram utilizadas juntas de rotação, porém também sem se restringir a variação do ângulo.

Para se permitir o movimento de adução e abdução dos dedos, como a integração não possui um detector de sobreposição das peças, foi alterado tanto a mão quanto as conexões entre os dedos. Do original, a parte superior (onde os dedos e a mão se encaixam) foi retirada, na figura 15 a comparação entre essas.

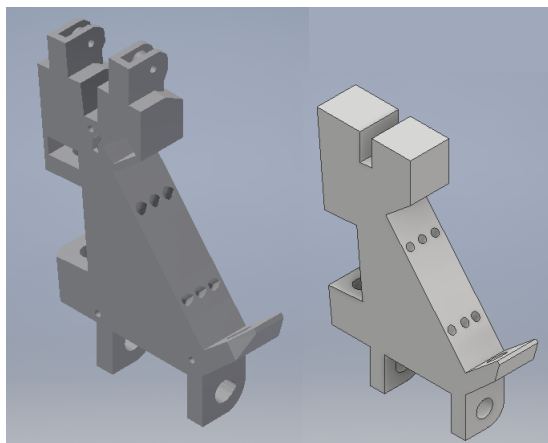


Figura 15 – Comparação da mão, a esquerda a original, a direita a reproduzida

Assim, foram recriadas essas partes superiores com as mesmas medidas e, além disso, foi adicionada uma parte circular, que representaria o eixo de rotação do movimento de adução e abdução. A figura 16 representa essa nova peça.

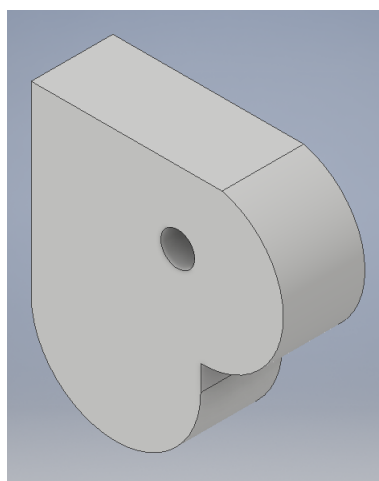


Figura 16 – Peça de ligação entre dedos e mão

Para os movimentos de pronação, supinação, adução, abdução e flexão e extensão do pulso, cada par de movimento (pronação/supinação, adução/abdução e flexão/extensão) seria realizado através de um eixo e, para permitir que todos esses movimentos fossem executados independentemente, foram feitos três eixos que estão ligados um a outro através de juntas de rotações com ângulos fixos. Por fim, o último eixo é, da mesma forma, ligado através de um eixo de rotação não fixo à mão. Esta peça está representada na figura 17

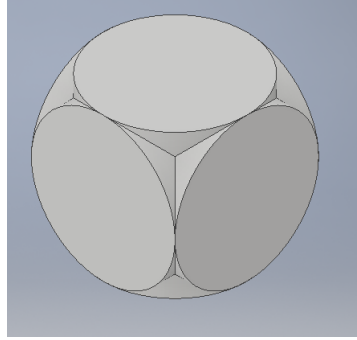


Figura 17 – Peça de movimentações do pulso

3.4.2 Protótipo Físico

Para o protótipo inicial replicar esses outros movimentos, foi planejado inserir solenóides nos dedos 2, 3, 4 e 5 para implementar o movimento Fi (únicos com esses movimentos). Cada um destes possui um eixo que encaixaria em chanfros no eixo de rotação da falange proximal, impedindo a movimentação destas e permitindo que as outras falanges se movimentassem sem rotacionar a falange proximal.

Os solenóides escolhidos foram o JF-0530B, por serem compactos e terem força suficiente para impedir o movimento da falange. Os solenóides seriam colocados em um furo na peça principal da mão, contudo, foi necessário conectar as peças dos dedos 4 e 5 na peça principal, para que os solenóides coubessem para todos os dedos, como se pode observar na figura 18.

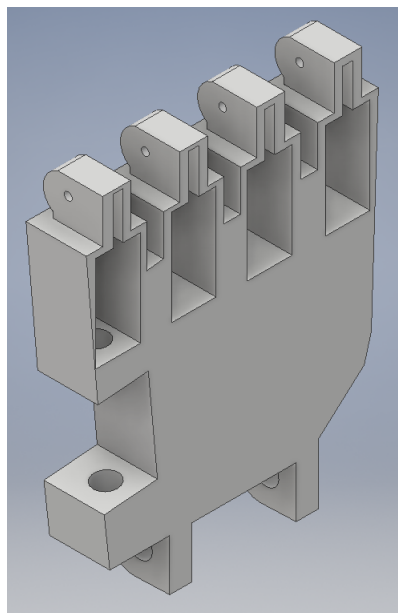


Figura 18 – Peça da mão com furos para solenóide

Para os outros movimentos, poderiam-se utilizar como inspiração os mecanismos utilizados por [Bulgarelli et al.\(3\)](#), onde o pulso possui uma junta esférica utilizando três

motores que acionam uma cadeia cinemática fechada, como é possível ver na figura 19

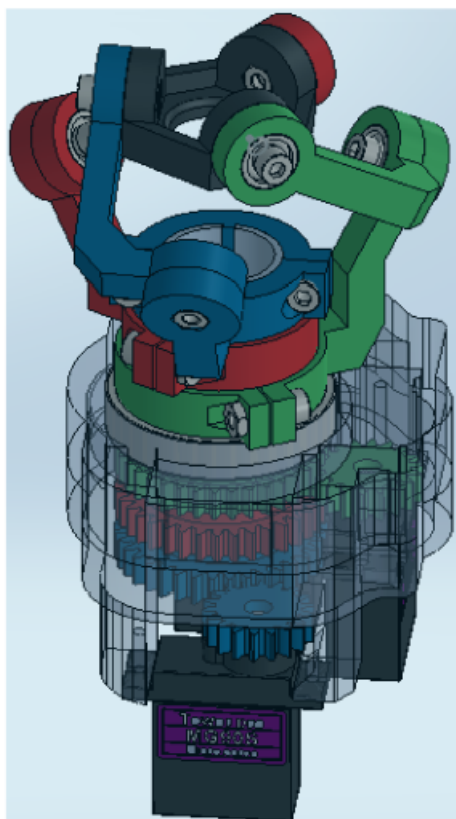


Figura 19 – Sugestão de uma junta esférica(3)

Já para o movimento de adução e abdução dos dedos, no mesmo projeto, foram utilizados tendões em conjunto com polias próximas a base dos dedos, como é visível na figura 20.

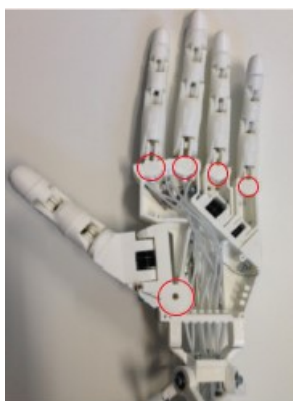


Figura 20 – Sugestão de adução e abdução nos dedos(3)

É importante destacar que esses ajustes não foram implementados devido à pandemia e representam apenas sugestões para implementar esses movimentos ausentes no protótipo inicial.

3.5 Integração Matlab e CAD

Com as peças remontadas em CAD, foi utilizado o add-in Simscape Multibody. Este permite que o Matlab extraia as conexões entre as peças, o formato destas e as características físicas (massa, momentos de inércia). Um modelo genérico é representado abaixo.

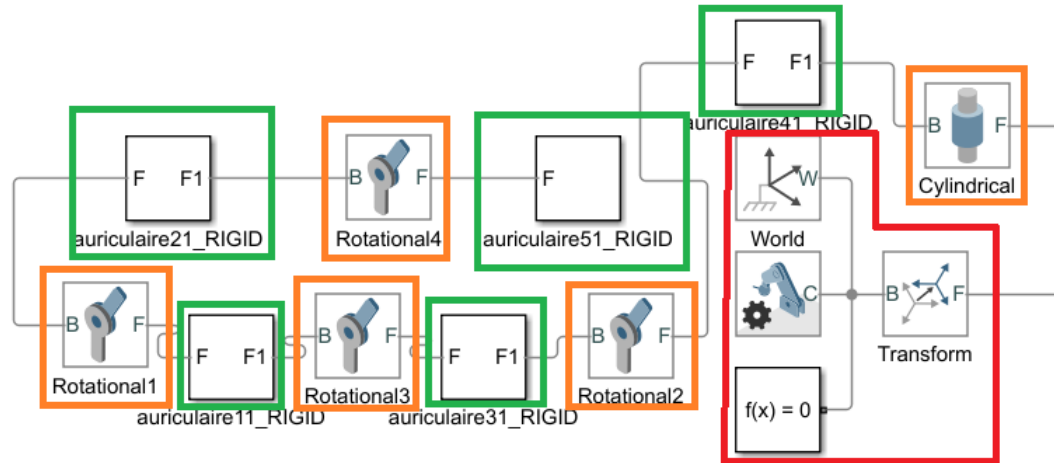


Figura 21 – Saída do add-in Simscape Multibody

Na figura 21, é possível notar algumas partes que compõem o sistema. Os componentes em vermelho geram as condições do ambiente onde o sistema será simulado, através de um sistema de coordenadas e forças externas, como a gravitacional. As partes em laranja são os acoplamentos entre as peças, no caso, as juntas cilíndricas e de rotação, e, por fim, as partes em verde representam os elos.

O modelo em Simulink permite que o sistema seja controlado através da aplicação de forças ou diretamente da posição nas juntas.(29)

Além disso, cada elo guarda os valores de massa e momento de inércia da peça original, permitindo que todos os cálculos da dinâmica do sistema, caso necessário, sejam feitos.

Para o projeto atual, o *Assembly* criado foi importado para o Matlab através desse *add-in*, contudo foi necessário determinar o comportamento do sistema para corretamente simulá-lo no Matlab. Na próxima seção será explicado como este foi determinado.

3.6 Modelagem

Com o protótipo recriado virtualmente, é preciso determinar o comportamento do sistema para se replicar na simulação. Com este intuito, obteve-se a variação do fio de acordo com os ângulos entre as falanges. Para isso foram feitas duas marcas, um no protótipo e um nos tendões e determinaram-se, ao movimentar as falanges, a distância entre essas duas

marcas, como é visível na figura 22. Além disso, mediu-se os ângulos que cada falange fazia entre elas, para isso, foram retiradas fotos dos dedos dado uma posição do motor e através da manipulação da imagem com transferidores, foi possível se determinar os ângulos, como é observável na figura 23.

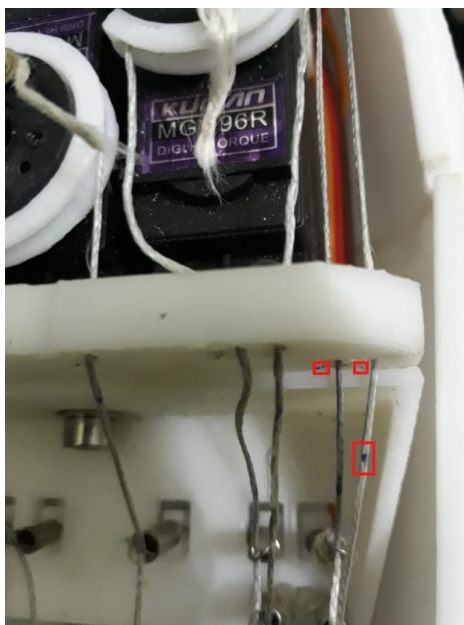


Figura 22 – Marcas no protótipo para medição

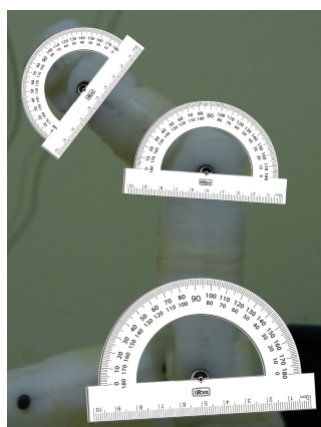


Figura 23 – Medição dos ângulos entre as falanges

Para o cálculo da variação da posição angular do motor correspondente a uma variação dessa marca, considerou-se que o fio se enrola ao redor das polias à medida que este gira. Desta forma, esta variação é dada pelo comprimento de uma sessão de circunferência, ou seja, $\Delta\theta * r$, onde $\Delta\theta$ é a variação da posição angular do motor e r é o raio da polia.

Desta forma, obtiveram-se as seguintes tabelas.

Tabela 3 – Medição do primeiro dedo

Medição	Ângulo 1a falange	Ângulo 2a falange	Ângulo motor
22,75	0	0	0
19,05	0	45	17,67
15,1	0	70	36,53
8,65	40	85	67,32
5,25	65	85	83,56

Tabela 4 – Medição do segundo dedo

Medição	1a falange	2a falange	3a falange	Motor
27,35	0	-10	-15	0
25,4	5	40	-15	9,31
19,15	5	75	-15	24,83
14,45	5	80	40	47,27
11,8	25	85	65	59,92
6,15	95	65	70	86,90

Tabela 5 – Medição do terceiro dedo

Medição	1a falange	2a falange	3a falange	Motor
25,95	0	-5	-10	0
23,7	-5	30	-10	10,74
20,85	-5	65	-10	24,35
17,85	0	70	-10	38,67

Tabela 6 – Medição do quarto dedo

Medição	1a falange	2a falange	3a falange	Motor
25,9	0	0	-25	0
23,35	0	30	-25	12,18
20	0	55	-25	28,17
16,3	0	85	-25	45,84
14,95	25	90	-25	52,28
12,85	50	90	-25	62,31
6,15	90	90	-15	94,3

Tabela 7 – Medição do quinto dedo

Medição	1a falange	2a falange	3a falange	Motor
20,85	0	0	-15	0
19,95	0	-10	55	4,3
20,85	80	0	20	27,93
17,85	80	90	70	78,3

Analisando-se os ângulos de rotação do motor e comparando com os das falanges, notou-se um comportamento linear, como é possível se ver na figura 24, onde se retrata a variação da distância entre as marcações pelo ângulo do motor.

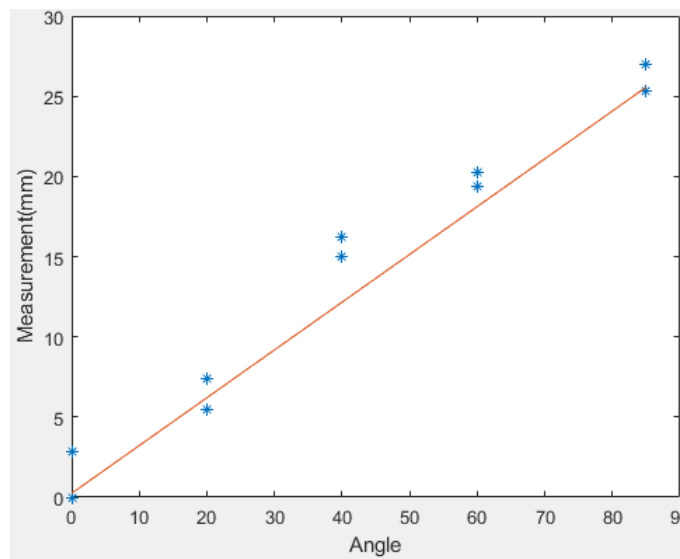


Figura 24 – Medição do comprimento entre marcações em função do ângulo do motor

Assim, utilizando o método dos mínimos quadrados, obtiveram-se as seguintes equações.

$$f_1(\theta_{11}, \theta_{12}) = 0,65 * \theta_{11} + 0,48 * \theta_{12} \quad (3.1)$$

$$f_2(\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}) = 0,43 * \theta_{21} + 0,36 * \theta_{22} + 0,31 * \theta_{23} \quad (3.2)$$

$$f_3(\theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}) = 0,43 * \theta_{31} + 0,53 * \theta_{32} + 0,32 * \theta_{33} \quad (3.3)$$

$$f_4(\theta_{41}, \theta_{42}, \theta_{43}) = 0,51 * \theta_{41} + 0,5 * \theta_{42} + 0,06 * \theta_{43} \quad (3.4)$$

$$f_5(\theta_{51}, \theta_{52}, \theta_{53}) = 0,31 * \theta_{51} + 0,47 * \theta_{52} + 0,15 * \theta_{53} \quad (3.5)$$

Onde θ_{nx} é o ângulo entre as falanges (x) e (x-1) do n-ésimo dedo. As falanges são enumeradas da mais proximal até a mais distal. Além disso, f_1, f_2, f_3, f_4 e f_5 são funções que, dados os ângulos θ_{nx} , retornam o ângulo que o motor deve girar.

Também notou-se que as falanges flexionavam e estendiam separadamente, ou seja, o movimento de uma só começava quando o de outra terminava.

3.7 Simulação

Com o modelo do sistema virtual e com o comportamento do sistema original, foi possível criar uma simulação que replicaria o protótipo. O modelo completo do sistema, sem nenhuma modificação pode ser visto na figura 25.



Figura 25 – Representação em Simulink do sistema inteiro

As partes em destaque representam diferentes partes da mão, eles são dedos 1, 2, 3, 4, 5, pulso, a palma da mão e as propriedades do ambiente (verde, vermelho, laranja, amarelo, azul, vinho, cinza e rosa respectivamente)

As mesmas partes indicadas na figura 21 são visíveis na figura 25 e controlando-se as juntas (partes em laranja da figura 21) pode-se fazer o sistema realizar o comportamento

desejado.

Os acoplamentos são tanto para as peças que serão engastadas quanto para as peças que possuirão movimento relativo entre elas e nos casos onde não deve haver movimento relativo, os valores de posição ficam fixados para um determinado valor, obtido através do modelo em CAD criado manualmente. Já para os outros casos, foi necessário criar uma lógica para se replicar o comportamento observado. Como todos os dedos se comportam de forma similar e em certa extensão até o pulso, será analisado apenas um dos dedos, porém a mesma lógica de programação foi aplicada para cada um deles.

A figura 26 mostra o sistema que simula o dedo 1.

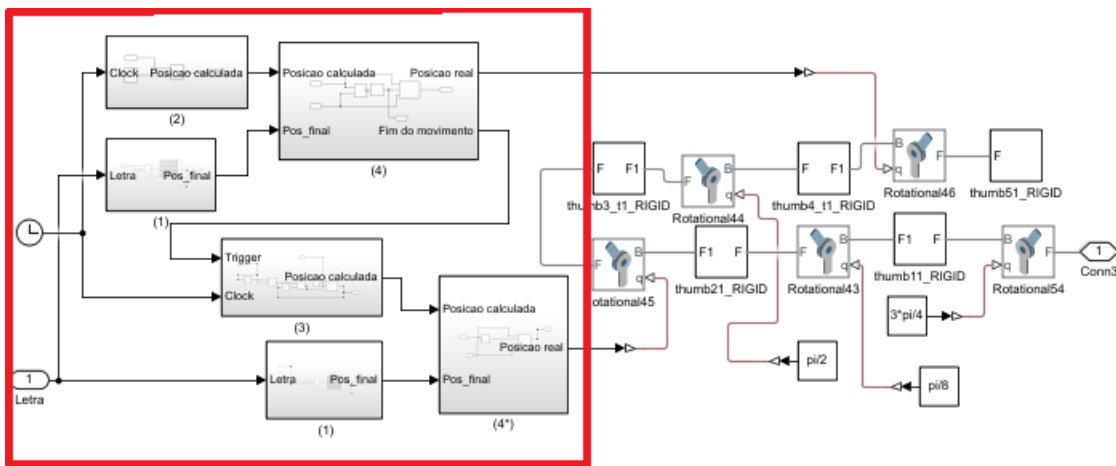


Figura 26 – Lógica de programação em Simulink do sistema

Como é possível ver na figura 26, a lógica de programação (parte em vermelho) foi dividida em 4 partes com diferentes funções: (1) definir a posição final, de acordo com a letra que se quer representar; (2) calcular a posição estimada da primeira falange a se mover; (3) calcular, a partir de um *trigger*, a posição estimada da próxima falange a se mover; e (4) calcular a posição real da falange dada a posição calculada e a posição final. A única diferença entre 4 e o 4* é que no segundo não há a saída do sinal de fim do movimento. Abaixo elas serão discutidas em detalhe.

Para o primeiro subsistema, espera-se uma lógica que dada uma entrada da letra escolhida, ele tenha como saída o valor da posição final de uma falange. Para isso, define-se um vetor com todos os valores de posições finais (denotado $\vec{V}$) indexados de acordo com a posição da letra no alfabeto, ou seja, $\vec{V}[1]$ é a posição final daquela falange para representar a primeira letra do alfabeto. Além disso, também obtém-se a soma escalar de todos os elementos deste vetor (nomeado S), ou seja, $S = \sum_{i=1}^{26} V[i]$. Então a substituição do elemento i do vetor $\vec{V}$ por 0 é feita e, com isso, retorna a diferença entre a soma dos valores desse novo vetor e S , desta forma, o resultado é $\vec{V}[1]$.

O segundo subsistema utiliza o *clock* do sistema para se obter o incremento, que, somado à posição inicial, gera a posição calculada, como podemos observar abaixo. O

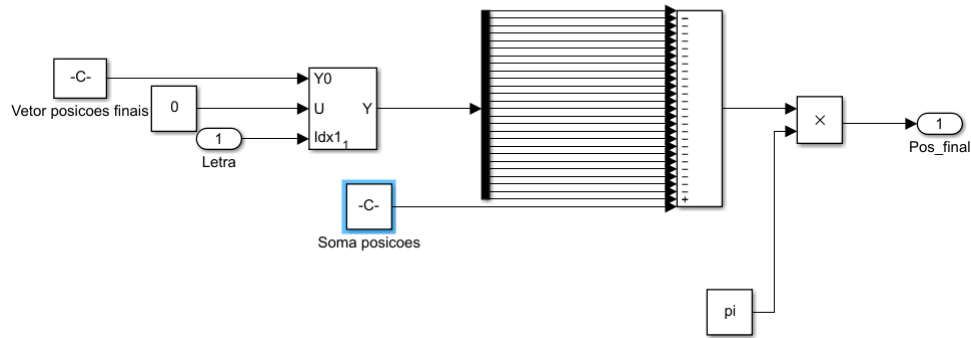


Figura 27 – Diagrama para definir posição final

parâmetro que multiplica o *clock* é o calculado pelo método dos mínimos quadrados (equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5). A figura 28 representa esse subsistema.

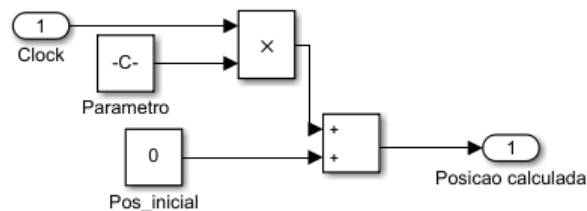


Figura 28 – Lógica de programação em Simulink da posição calculada

Assim, para cada parte que utiliza essa lógica de programação, a posição é definida por $P(t) = C * t$, onde C são os parâmetros das equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5

Para as outras falanges, utiliza-se primeiramente um bloco de memória para se obter o incremento de tempo entre os passos, e subtrai-se esse valor da posição inicial se o *trigger* tiver sido ativado; caso contrário, ele se mantém na posição inicial. Assim como no anterior, o parâmetro que multiplica o *clock* é o calculado pelo método dos mínimos quadrados. Esse subsistema é representado na figura 29

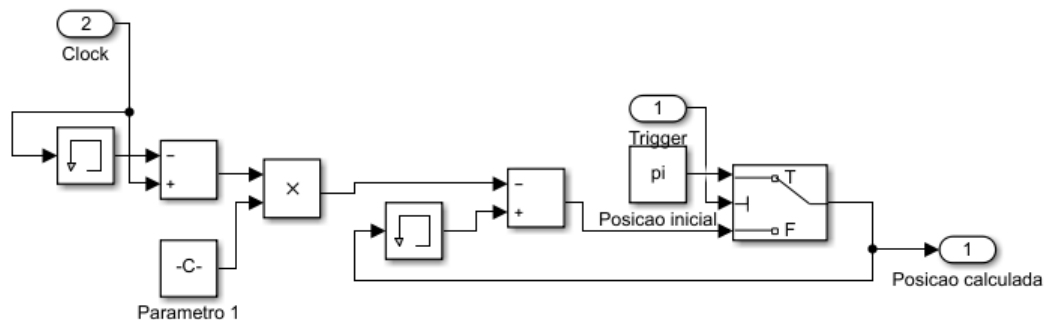


Figura 29 – Lógica de programação em Simulink da posição calculada

Com isso, o próximo subsistema gera a nova posição e compara com o valor final e, caso esta nova posição calculada seja maior que a posição final, o sistema gera um sinal de fim de movimento e não modifica mais a posição. Esse subsistema é observável na figura 30

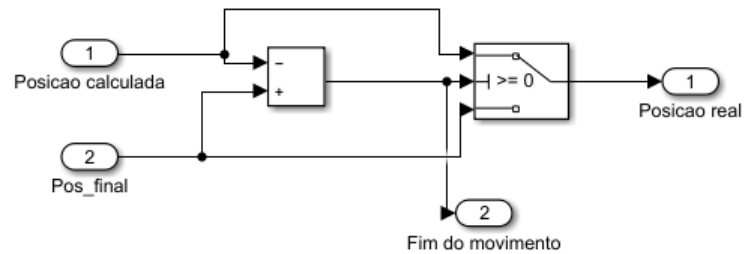


Figura 30 – Lógica de programação em Simulink da posição calculada

Os mesmos componentes são utilizados para simular o pulso, contudo, não no mesmo formato, a figura 31 representa essa lógica de programação (parte em vermelho).

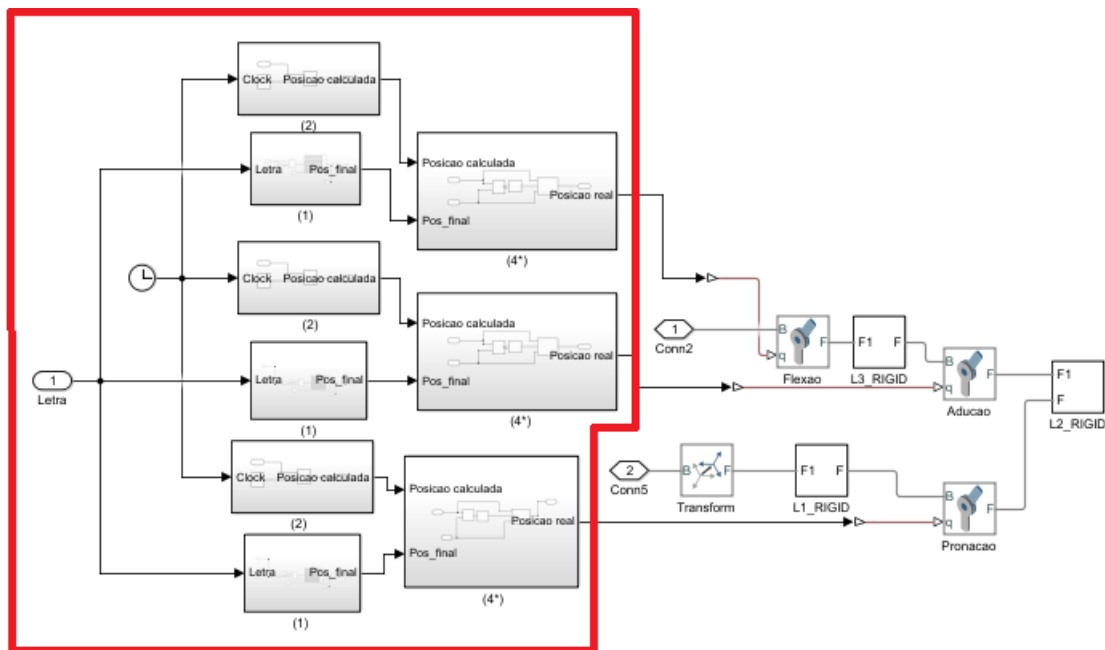


Figura 31 – Lógica de programação em Simulink do pulso

Após implementar todos esses sistemas, o Matlab gerou vídeos que demonstram os resultados. A figura 32 demonstra o resultado da simulação

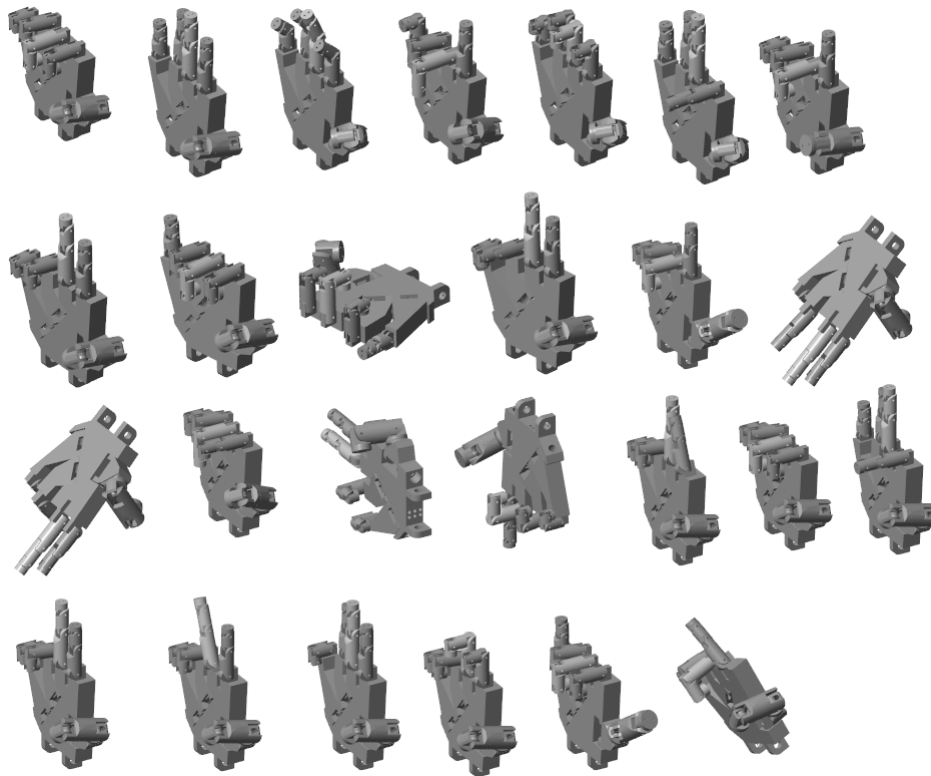


Figura 32 – Representação da letra em Matlab em ordem alfabética

Além disso, observando as posições durante a simulação, é possível perceber que as falanges se comportaram como o esperado. Cada falange flexiona após o fim do movimento da anterior e possuem velocidades diferentes, determinadas pelas equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5. Isso é visível pela figura 33, onde o tempo é medido em segundos e a posição em radianos.

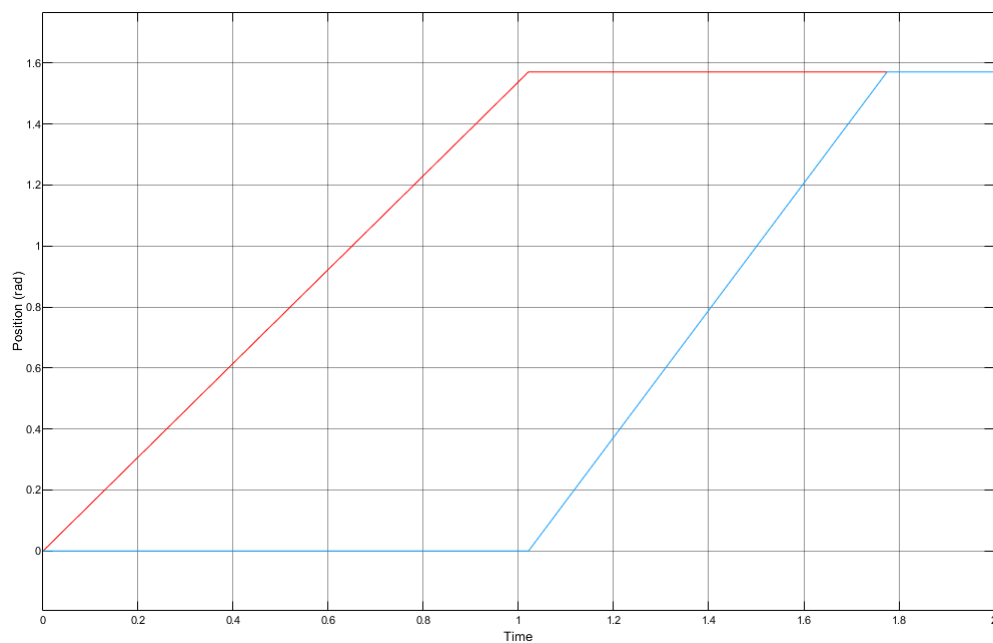


Figura 33 – Gráfico da posição pelo tempo

Para a figura 33, ambas foram colocadas nos mesmos limites para facilitar a visualização.

4 CONCLUSÕES

A mão humana ainda continua sendo um importante exemplo de mecanismo de alta complexidade, em grande parte pela sua quantidade de graus de liberdade. Projetos de diversas áreas e com amplos usos utilizaram esse modelo e, baseado em um destes, o presente projeto construiu uma prótese e sugeriu melhoras para conseguir representar letras da Libras.

O projeto original utilizado para isso, apesar de apresentar uma série de problemas, é funcional, e consegue realizar uma quantidade limitada de letras. Então, para permitir modificações no projeto, foi medido o funcionamento do protótipo e criado um modelo virtual. Este foi produzido através da reconstrução do protótipo em CAD e depois importado para o Matlab através da ferramenta *Simscape Multibody*. Em posse do comportamento medido da prótese montada e deste modelo virtual, o sistema de simulação foi criado e, desta forma, permitiu a reprodução das letras no Matlab.

Destaca-se dessa forma, a validade de tal metodologia para se projetar uma lógica de programação satisfatória que reproduz fielmente o modelo original e que pode permitir modificações para futuros projetos, tanto deste protótipo como para outros.

REFERÊNCIAS

- 1 LANGEVIN, G. *Inmoov Open source 3D printed life-size robot*. Disponível em: inmoov.fr. Citado 3 vezes nas páginas 5, 6 e 2.
- 2 RESEARCHGATE. *Letras em Libras*. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Letras-em-LIBRAS-Acreditamos-que-para-aumentar-o-realismo-e-melhorar-o_fig2_262523644. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 13.
- 3 BULGARELLI, A. et al. A low-cost open source 3d-printable dexterous anthropomorphic robotic hand with a parallel spherical joint wrist for sign languages reproduction. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, v. 13, n. 3, p. 126, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 8, 3, 19 e 20.
- 4 TOWNSEND, W. T. Barretthand grasper: Programmably flexible part handling and assembly. *Humanoid Robotics: A Reference*, p. 1–17, 2017. Citado na página 1.
- 5 SICILIANO, B.; KHATIB, O. *Springer handbook of robotics*. [S.l.]: Springer, 2016. Citado na página 1.
- 6 BICCHI, A.; MARIGO, A. Dexterous grippers: Putting nonholonomy to work for fine manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, v. 21, n. 5-6, p. 427–442, 2002. Citado na página 1.
- 7 BICCHI, A. Hands for dexterous manipulation and robust grasping: a difficult road toward simplicity. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 16, n. 6, p. 652–662, 2000. Citado na página 1.
- 8 HIROSE, S.; UMETANI, Y. The development of soft gripper for the versatile robot hand. *Mechanism and Machine Theory*, v. 13, n. 3, p. 351–359, 1978. Citado na página 1.
- 9 YAMANO, I.; MAENO, T. Five-fingered robot hand using ultrasonic motors and elastic elements. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005. Citado na página 1.
- 10 HIRZINGER, G. et al. Dlr's multisensory articulated hand. *Experimental Robotics V Lecture Notes in Control and Information Sciences*, p. 47–55, 1998. Citado na página 1.
- 11 NAMIKI, A. et al. Development of a high-speed multifingered hand system and its application to catching. *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*. Citado na página 2.
- 12 TZVETKOVA, G. V. Robonaut 2: Mission, technologies, perspectives. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, p. 97–102, 2017. Citado na página 2.
- 13 CONTROZZI, M. et al. Bio-inspired mechanical design of a tendon-driven dexterous prosthetic hand. *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 2010. Citado na página 2.

- 14 MOYER E.L. FAULRING, J. S.-M. T. *One motor finger mechanism*. Citado na página 2.
- 15 MEGHDARI, A. et al. Design and realization of a sign language educational humanoid robot. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, v. 95, n. 1, p. 3–17, 2018. Citado na página 3.
- 16 KOSE, H. et al. Evaluation of the robot assisted sign language tutoring using video-based studies. *International Journal of Social Robotics*, v. 4, n. 3, p. 273–283, 2012. Citado na página 4.
- 17 AKALIN, N.; KOSE, H. A new approach to sign language teaching: Humanoid robot usage. *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2014. Citado na página 4.
- 18 KRÄMER, N. C. et al. Embodied conversational agents: Research prospects for social psychology and an exemplary study. *Social Psychology*, v. 40, n. 1, p. 26–36, feb 2009. Citado na página 4.
- 19 BURGOON, J. et al. *Interactivity in human–computer interaction: a study of credibility, understanding, and influence*. Pergamon, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563200000297>. Citado na página 4.
- 20 AUERBACH, P. B. D. et al. *Service robot feature design effects on user perceptions and emotional responses*. Springer-Verlag, 1970. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11370-010-0060-9>. Citado na página 4.
- 21 NOVIELLI, N.; ROSIS, F. d.; MAZZOTTA, I. *User attitude towards an embodied conversational agent: Effects of the interaction mode*. North-Holland, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378216609003324>. Citado na página 4.
- 22 TAPUS, A.; TAPUS, C.; MATARIC, M. J. *User—robot personality matching and assistive robot behavior adaptation for post-stroke rehabilitation therapy*. 2008. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.2309&rep=rep1&type=pdf>. Citado na página 4.
- 23 GARDINER, P. M. et al. Engaging women with an embodied conversational agent to deliver mindfulness and lifestyle recommendations: A feasibility randomized control trial. *Patient Education and Counseling*, v. 100, n. 9, p. 1720 – 1729, 2017. ISSN 0738-3991. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0738399117302495>. Citado na página 4.
- 24 D.KIDD, C.; BREAZEAL, C. Effect of a robot on user perceptions. *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004. Citado na página 4.
- 25 LANDAR, H.; STOKOE, W. C. Sign language structure: An outline of the visual communication systems of the american deaf. *Language*, v. 37, n. 2, p. 269, 1961. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 12.

-
- 26 ALDERSSON, R. R.; MCENTEE-ATALIANIS, L. J. A lexical comparison of signs from icelandic and danish sign languages. *Sign Language Studies*, v. 9, n. 1, p. 45–87, 2008. Citado na página 4.
- 27 JOHNSON, R. E.; LIDDELL, S. K. Toward a phonetic representation of hand configuration: The fingers. *Sign Language Studies*, v. 12, n. 1, p. 5–45, 2011. Citado na página 12.
- 28 JOHNSON, R. E.; LIDDELL, S. K. Toward a phonetic representation of hand configuration: The thumb. *Sign Language Studies*, v. 12, n. 2, p. 316–333, 2012. Citado na página 12.
- 29 PARK, S. *DASL Wiki*. 2018. Disponível em: https://www.daslhub.org/unlv/wiki/doku.php?id=example_of_matlab_simscape_multibody. Citado na página 21.