

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

**Luva de captura eletrônica de movimentos
baseada em Unidades de Medição Inercial
(IMU) e sensores de força resistivos**

Autor: Filipe de Souza Freitas

Orientador: Prof. Dr. Daniel M. Muñoz Arboleda

Coorientador: Dr. Sergio Andres Pertuz Mendez

Brasília, DF

2022



Filipe de Souza Freitas

**Luva de captura eletrônica de movimentos baseada em
Unidades de Medição Inercial (IMU) e sensores de força
resistivos**

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia Eletrônica da Universidade
de Brasília, como requisito parcial para ob-
tenção do Título de Bacharel em Engenharia
Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Daniel M. Muñoz Arboleda

Coorientador: Dr. Sergio Andres Pertuz Mendez

Brasília, DF

2022

Filipe de Souza Freitas

Luva de captura eletrônica de movimentos baseada em Unidades de Medição Inercial (IMU) e sensores de força resistivos/ Filipe de Souza Freitas. – Brasília, DF, 2022-

54 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Daniel M. Muñoz Arboleda

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. Luva. 2. Eletrônica. I. Prof. Dr. Daniel M. Muñoz Arboleda. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Luva de captura eletrônica de movimentos baseada em Unidades de Medição Inercial (IMU) e sensores de força resistivos

CDU 02:141:005.6

Filipe de Souza Freitas

Luva de captura eletrônica de movimentos baseada em Unidades de Medição Inercial (IMU) e sensores de força resistivos

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 14 de fevereiro de 2022:

Prof. Dr. Daniel M. Muñoz Arboleda
Orientador

Dr. Sergio Andres Pertuz Mendez
Coorientador

Prof. Dr. Renato Coral Sampaio
Convidado 1

Prof. Dr. Diogo Caetano Garcia
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Resumo

Manipuladores robóticos inspirados na forma e mecanismo da mão humana, que possui 24 graus de liberdade, são complexos sistemas de controle em malha fechada. O controle em malha fechada proporciona insensibilidade a perturbações externas e insensibilidade a variações em parâmetros do sistema. Desta forma, manipuladores robóticos podem se beneficiar de um sistema compacto de medição da postura do manipulador. Nesse sentido, este trabalho apresenta o projeto de uma luva eletrônica para captura de informações de orientação no espaço, dos dedos da mão humana, e força da mão humana. A forma adotada é através de uma rede de IMUs (*Inertial measurement Unit*) e sensores de pressão, dados estes capturados e armazenados por uma unidade de processamento que realiza a comunicação com um computador, transmitindo os dados por comunicação de rede sem fio. Este trabalho apresenta, ainda, o processamento dos dados de aceleração em um modelo cinemático direto, utilizando as notações de Denavit-Hatenberg, em representação gráfica. Devido ao alto custo dos dispositivos encontrados no mercado a elaboração da luva levou o aspecto de desenvolvimento de baixo custo, o total gasto no desenvolvimento foi de R\$ 1017,56 reais enquanto o material necessário para construção de uma luva custa R\$ 688,38.

Nos experimentos foi observado que a EP32 é capaz de integrar leitura, cômputo da postura e comunicação com paralelismo. A taxa de transmissão utilizada nos testes foi de 25 ms e 50ms. O que representa uma taxa de amostragem de 400Hz e 200Hz, respectivamente. A luva desenvolvida não é precisa como os modelos no mercado, que contam com sensores mais sensíveis que permitem a estimativa com 1º de precisão, enquanto este trabalho apresenta 7º embora este possua o *feedback* de força.

Palavras-chaves: Luva, IMU, pressão, sensores, posição, acelerômetro, giroscópio, resistivo.

Abstract

Robotic manipulators inspired by the shape and mechanism of the human hand, which has 24 degrees of freedom, are complex closed-loop control systems. Closed loop control provides insensitivity to external disturbances and insensitivity to variations in system parameters. Thus, robotic manipulators can benefit from a compact system for measuring the manipulator's posture. In this sense, this work presents the design of an electronic glove for capturing position and force information from the human hand. The adopted way is through a network of Inertial measurement Unit (IMUs) and pressure sensors, data captured and stored by a processing unit that communicates with a computer, transmitting the data through a wireless network. This work also presents the processing of acceleration data in a forward kinematic model, using Denavit-Hatenberg notations, in a graphical representation. Due to the high cost of the devices found in the market, the elaboration of the glove took the aspect of low cost development, the total spent in the development was R\$ 1017,56 reais, while the material necessary for the construction of one glove costs R\$ 688,38. In the experiments it was observed that the EP32 is capable of integrating readout, posture calculation and communication with parallelism. The transmission rate used in the tests was 25 ms and 50ms. This represents a sampling rate of 400Hz and 200Hz, respectively. The glove developed is not as precise as the models on the market, which have more sensitive sensors that allow an estimation with 1° precision, while this work presents 7° although it has touch force *feedback* .

Key-words: Glove, IMU, pressure, sensors, position, accelerometer, resistive pressure sensor.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mão direita. Na imagem A, vista dorsal; imagem B, vista posterior. Fonte: Dados obtidos de [1].	16
Figura 2 – Representação do modelo cinemático para um dedo da mão humana.	18
Figura 3 – Representação gráfica do sistema de coordenadas cartesianas. Fonte: Adaptado de [2].	19
Figura 4 – Representação gráfica do sistema de coordenadas esféricas Fonte: Adaptado de [2].	19
Figura 5 – Sayre Glove, um dos primeiros projetos de luva eletrônica com sensores acoplados . Fonte: [3].	23
Figura 6 – Imagens de produtos relacionados a luvas eletrônicas encontrados no mercado.	25
Figura 7 – Diagrama de alto nível do projeto. Fonte: elaborado pelo autor. Software: DRAW.IO.	26
Figura 9 – Projeto da PCB da placa de aquisição. (a) Roteamento da placa de circuito impresso. (b) Vista da camada superior. (c) Vista da camada inferior	28
Figura 8 – Organização dos componentes na luva demonstrado em um desenho de uma mão humana. Pontos vermelhos indicam localização das IMUs. Os sensores de pressão são localizados nas pontas dos dedos no local onde existem as digitais. Fonte: elaborado pelo autor. Software: DRAW.IO.	29
Figura 10 – Fluxograma representando o acionamento dos eventos que controlam o comportamento das tarefas. Fonte: elaborado pelo autor. Software: DRAW.IO.	31
Figura 11 – Montagem do experimento de verificação do ângulo informado pela IMU. Fonte: elaborado pelo autor.	36
Figura 12 – Teste realizado para verificar a estimativa de ângulo que a IMU faz para as articulações de um dedo, seguindo o modelo apresentado na seção de fundamentação teórica, 2.1.1. Fonte: elaborado pelo autor. Software: MATLAB.	37
Figura 13 – Placa de aquisição preparada para escalonamento da solução para cinco dedos. Fonte: elaborado pelo autor.	38
Figura 14 – Componentes e fabricação da luva eletrônica. Fonte: elaborado pelo autor.	38
Figura 15 – Sequência utilizada para captura de movimento de flexão para o dedo 2. Fonte: elaborado pelo autor. Vídeo disponível em: https://youtu.be/cOSMikrNFPA	40

Figura 16 – Experimento de flexão e extensão do dedo representado pelos cálculos dos parâmetros de Denavit-Hatenberg, com o protótipo da luva. Na figura à esquerda, representação lateral Software: MATLAB.	40
Figura 17 – Imagem capturada a partir do vídeo do experimento de agarre e movimentos finos. Fonte: elaborado pelo autor. Vídeo do experimento disponível em: https://youtu.be/uwbtWcrSnn8	41
Figura 18 – Representação da pressão exercida sobre o sensor (gráfico no canto superior esquerdo), representação dos ângulos em relação a IMU de referência (canto inferior esquerdo) e ilustração do movimento em gráfico ao longo do tempo(gráfico à direita). Fonte: autoria própria. Software: MATLAB.	41
Figura 19 – Imagem capturada a partir do vídeo do experimento de agarre e movimentos bruscos. Fonte: autoria própria. Vídeo do experimento disponível em: https://youtu.be/fsFui6n-vYU	42
Figura 20 – Demonstração gráfica dos dados coletados para o experimento de agarre e movimentos bruscos. Representação da pressão exercida sobre o sensor (gráfico no canto superior esquerdo), representação dos ângulos em relação a IMU de referência (canto inferior esquerdo) e ilustração do movimento em gráfico ao longo do tempo(gráfico à direita). Fonte: autoria própria. Software: MATLAB.	42
Figura 21 – Imagem capturada a partir do vídeo do experimento de digitação. Fonte: autoria própria. Vídeo do experimento disponível em: https://youtu.be/b1A6eqT4	
Figura 22 – Representação da pressão exercida sobre o sensor (gráfico no canto superior esquerdo), representação dos ângulos em relação a IMU de referência (canto inferior esquerdo) e ilustração do movimento em gráfico ao longo do tempo(gráfico à direita). Fonte: autoria própria. Software: MATLAB.	43
Figura 23 – Imagem capturada a partir do vídeo do experimento de agarre e movimentos finos. Fonte: autoria própria. Vídeo do experimento disponível em: https://youtu.be/CQJn9AiNX8o	44
Figura 24 – Representação da pressão exercida sobre o sensor (gráfico no canto superior esquerdo), representação dos ângulos em relação a IMU de referência (canto inferior esquerdo) e ilustração do movimento em gráfico ao longo do tempo(gráfico à direita). Fonte: autoria própria. Software: MATLAB.	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela com as informações dos principais músculos e a participação de cada um nos movimentos da mão.	17
Tabela 2 – Relação entre articulação e restrição de movimento.	17
Tabela 3 – Modelos de luvas eletrônicas encontradas no mercado. Fonte: elaborado pelo autor.	24
Tabela 4 – Custo de material para a produção de uma luva.	33
Tabela 5 – Materiais utilizados nos testes para configuração com um dedo.	33
Tabela 6 – Parâmetros de Denavit-Hatenberg para o modelo apresentado na Figura 2.	36

Lista de abreviaturas e siglas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> ou conversor analógico para digital
CMC	Carpometacarpal
CSV	<i>Comma-separated values</i>
esp-idf	<i>Espressif IoT Development Framework</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IF	Interfalângica
IFD	Interfalângica distal
IFP	Interfalângica proximal
IMU	<i>Inertial measurement unit</i>
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i>
MCF	Metacarpofalângica
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
mm	Milímetro.
SDA	<i>serial data</i>
SCL	<i>serial clock</i>
RFID	<i>Radio-Frequency IDentification</i> ou Identificação por radiofrequência
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
Wi-Fi	<i>wireless fidelity</i>

Lista de símbolos

α	Letra grega alpha, ângulo em torno da normal em comum entre o eixo z da junta anterior e da junta atual.
β	Peso atribuído em função do tempo de acomodação, e do tempo e amostragem.
Δt	Tempo de amostragem.
τ	Constante de tempo.
θ	Letra grega theta, ângulo para mensurar abdução e adução.
θ_{ac}	Estimativa de ângulo do acelerômetro.
θ_{gir}	Estimativa de ângulo do giroscópio.
$theta_1$	Orientação do ângulo θ para o sensor de referência.
$theta_2$	Orientação para o ângulo θ para a articulação MCF.
$theta_3$	Orientação para o ângulo θ para a articulação IFP.
$theta_4$	Orientação para o ângulo θ para a articulação IFD.
$A_{X,out}$	Aceleração no eixo X.
$A_{Y,out}$	Aceleração no eixo Y.
$A_{Z,out}$	Aceleração no eixo Z.
d	Distância do eixo anterior até a normal em comum.
a	Distância entre os eixos z no modelo cinemático do dedo.
phi	Letra grega phi, ângulo antre as falanges mediais, proximais e distais nos movimentos de extensão e flexão.
f	Força, medida em gramas.
V	Tensão elétrica, em Volts.
a_{coeff}	Coefficiente de regressão da escala da função exponencial.
b_{coeff}	Coefficiente de regressão da função exponencial.
°	Graus.

Hz	Unidade SI, frequência de um fenômeno periódico cujo período tem a duração de um segundo.
k	kilo, prefixo multiplicador do sistema internacional de unidades para 1000.
us	<i>Microseconds</i> , microsegundos.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.2	Organização do documento	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Biomecânica	16
2.1.1	Modelo cinemático	18
2.1.2	Orientação	19
2.1.3	Filtragem dos dados	20
2.1.4	Calibração	21
2.2	Protocolo I2C	22
2.3	Estado da arte	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Solução	26
3.2	Hardware	27
3.3	Software Embarcado	29
3.3.1	Materiais e Custos	32
4	RESULTADOS	34
4.1	Protocolos de Teste	34
4.2	Validação do algoritmo para estimação da orientação	36
4.3	Resultados com a luva eletrônica	38
4.3.1	Experimento 1: Flexão e extensão de grande amplitude	39
4.3.2	Experimento 2: agarre e movimentos finos	41
4.3.3	Experimento 3: agarre e movimentos bruscos	42
4.3.4	Experimento 4: movimentos rápidos	43
4.3.5	Experimento 5: pressão incremental	43
4.4	Testes de taxa de transmissão e desempenho	44
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICE A – CAPTURA DE TELA WIRESHARK	50

APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO UTILIZADO PARA TESTAR O MODELO CINEMÁTICO DIRETO.	52
APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO CIRCUITO DA LUVA	53

1 Introdução

A mão humana possui grande versatilidade e variedade de movimentos, permitindo ao ser humano interagir com o ambiente externo através da manipulação de objetos, além de permitir a comunicação através de gestos.

A mão robótica é um mecanismo inspirado na anatomia da mão humana, que pode ser utilizada como prótese [4, 5, 6] ou como manipuladores terminais de braços robóticos [7, 8]. Para que uma mão robótica segure objetos e consiga manipulá-los, é necessário além de agarrar objetos com formatos diversos, controlar a força exercida pelo dispositivo [9]. O controle de agarre em malha fechada é uma das estratégias que proporcionam melhor resultado para as mãos robóticas [10]. Existem basicamente duas abordagens, uma envolvendo visão computacional e outra através de uma rede de sensores [11]. As soluções baseadas no processamento de imagens necessitam do posicionamento de mais de uma câmera no ambiente, limitando a portabilidade do sistema.

Com o intuito de desenvolver um dispositivo que proporcione o *feedback* de posição e força, propõe-se o desenvolvimento de um dispositivo vestível baseado em uma luva eletrônica. Este dispositivo vem sendo desenvolvido por vários grupos de pesquisa desde a década de 1970, com intuito, inicialmente, de explorar novas formas de interação entre o ser humano e o computador, [12].

Neste trabalho deseja-se realizar a captura de movimentos da mão humana de forma que seja possível conhecer a posição de um ou mais dedos da mão e, dessa maneira, estimar a pose dos dedos ao longo do tempo. Adicionalmente, pretende-se capturar informações de toque e pressão exercida pela mão. Para isso, optou-se por utilizar um conjunto de sensores, tais como Unidades de Medição Inercial (em inglês, *inertial measurement unit* - IMU) nas falanges dos dedos, e sensores de força nas pontas dos dedos.

Um aspecto importante no desenvolvimento da luva eletrônica que possa ser usada para controlar uma mão robótica é a taxa de transmissão e portabilidade do sistema em tamanho e peso. Para tanto, seguiu-se o desenvolvimento de uma luva eletrônica que além de comportar os sensores, possa enviar os dados sem a utilização de cabos, e seja de fácil manuseio. Para atender esses requisitos e avaliar a configuração proposta optou-se pelo uso da plataforma **ESP32** e do sistema operacional *Free RTOS*. O dispositivo contando com 15 sensores, 10 unidades de medição inercial e 5 sensores de pressão.

Como não é possível realizar a leitura e processamento de todos os sensores de forma paralela foi implementada uma solução com multiplexação no tempo, permitindo ao microcontrolador realizar a leitura dos dados individuais de cada sensor, identificar a postura e a pressão exercida pelo agarre e, então, comunicar-se com uma plataforma

externa transmitindo esta informação.

1.1 Objetivos

Este trabalho objetiva o desenvolvimento de uma luva eletrônica para capturar informações de posição e força exercidas pela mão humana com capacidade de comunicação para uma interface externa que possa armazenar e utilizar estes dados. Para atingir este objetivo foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Levantamento do modelo de cinemática direta da mão humana utilizando a notação de Denavit-Hatenberg;
- Desenvolvimento de uma placa eletrônica de aquisição de dados de até 10 unidades inerciais (IMUs) e de 5 sensores de força, permitindo a multiplexação dos sinais enviados através da comunicação I2C e a conexão com uma fonte de energia;
- Construção de um protótipo para coletar informações de posição angular e força de um dedo. O protótipo deverá integrar em uma luva os sensores, um microcontrolador ESP32 e a placa eletrônica de aquisição;
- Desenvolvimento de uma rotina de aquisição de dados e comunicação externa no microcontrolador usando multiplexação no tempo através do mecanismo de *tasks* do RTOS;
- Desenvolvimento e execução de um protocolo de testes que permitam validar o posicionamento informado pela luva através da utilizando de uma mão robótica.

1.2 Organização do documento

O capítulo dois deste documento contém a fundamentação teórica, trazendo a estruturação da mão humana, restrições por categoria de movimento e descrição dos movimentos, assim, como, o tipo de movimento a ser observado no trabalho. Apresenta-se também como é feita a orientação no espaço, sistema de coordenadas utilizado e o modelo cinemático que representa as interações das juntas. É apresentada também uma revisão do estado da arte e os modelos de luva eletrônica existentes e em desenvolvimento, tomando como base o *review* de [11] e pesquisas bibliográficas nas bases IEEEExplorer, Springer e Research Gate. No capítulo três, é apresentada a metodologia de desenvolvimento adotada no trabalho. No capítulo quatro são discutidos e apresentados os resultados alcançados.

2 Fundamentação teórica

2.1 Biomecânica

Neste trabalho, o foco consiste na descrição e monitoramento de movimentos de abdução, adução, extensão e flexão dos dedos na mão humana. Segundo o manual de cinesiologia [1], o movimento de flexão consiste na diminuição do ângulo entre dois ossos. O movimento de extensão é o oposto à flexão resultando no aumento do ângulo entre ossos. Abdução consiste em um movimento lateral de distanciamento da linha mediana e a adução, em contrapartida, é a aproximação do membro à linha mediana. Na mão humana identificam-se 29 ossos, representados na Figura 1. Cada dedo é composto por falanges, imagem, B na Figura 1. Excetuando-se o polegar, cada dedo contém três tipos de falanges: distal, medial e proximal. O polegar é constituído de falange distal e da falange proximal. A Tabela 1 contém a relação entre os músculos, grupos musculares, articulações e movimentos relacionados à mão. Para referência, adota-se neste trabalho a numeração apresentada na Figura 1, exemplo: **polegar** como dedo 1, **indicador** como dedo 2, **médio** como dedo 3, **anelar** como dedo 4 e **mindinho** como dedo 5.

Em [2], grau de liberdade é definido como o movimento independente realizado por cada articulação em relação à articulação anterior. O contexto desta descrição refere-se às juntas encontradas em braços robóticos, entretanto, faz-se necessária a utilização desta definição para descrição de um modelo de cinemática direta da mão, tomando um paralelo conforme restrições em cada articulação. As articulações Interfalângica Proximal (IFP) e

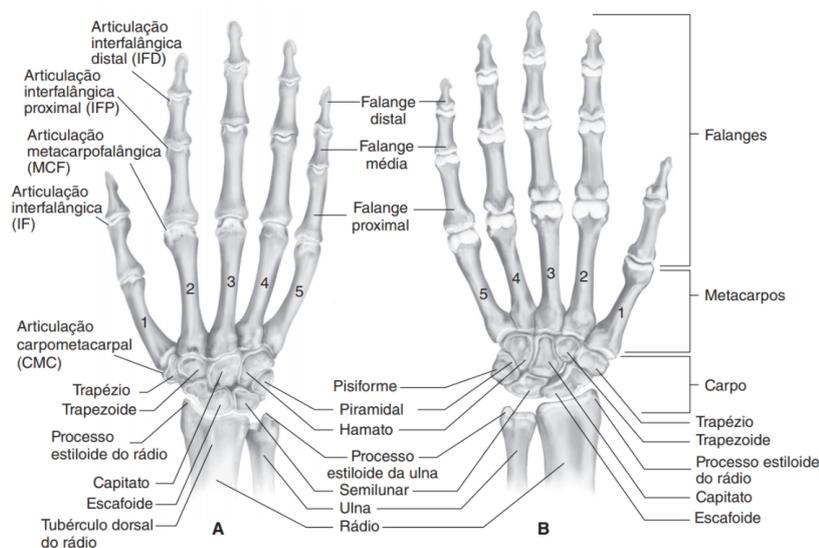


Figura 1 – Mão direita. Na imagem A, vista dorsal; imagem B, vista posterior. Fonte: Dados obtidos de [1].

Tabela 1 – Tabela com as informações dos principais músculos e a participação de cada um nos movimentos da mão.

Grupo	Subgrupo	Músculos	Movimento e articulação
	Anteriores	Flexor superficial dos dedos	Flexão das articulações IFP e MCF do 2° ao 5° dedo
		Flexor profundo dos dedos	Flexão das articulações IFD, IFP e MCF do 2° ao 5° dedo
		Flexor longo do polegar	Flexão das três articulações do polegar IF, MCF e CMC
Extrínsecos	Anteriores	Abdutor longo do polegar	Abdução do polegar (articulação CMC)
		Extensor curto do polegar	Extensão das articulações MCF e CMC do polegar
		Extensor longo do polegar	Extensão das três articulações do polegar (IF, MCF e CMC)
	Posteriores	Extensor dos dedos	Extensão das três articulações do 2° a 5° dedo (IFD, IFP e MCF)
		Extensor do indicador	Extensão das articulações IFD, IFP e MCF do dedo indicador
		Extensor do dedo mínimo	Extensão das três articulações do dedo mínimo (IFD, IFP e MCF)
Intrínsecos	Tenares	Flexor curto do polegar	Flexão das articulações MCF e CMC do polegar
		Abdutor curto do polegar	Abdução do polegar (articulação CMC)
		Oponente do polegar	Oposição do polegar (articulação CMC)
	Palmares profundos	Adução do polegar	Adução do polegar (articulação)
		Interósseos	Abdução dos dedos na articulação MCF
		Lumbricais	Flexão da articulação MCF e extensão simultânea das articulações IFP e IFD
Hipotenares	Flexor do dedo mínimo	Flexão das articulações MCF e CMC do dedo mínimo	
	Abdutor do dedo mínimo	Abdução da articulação MCF do dedo mínimo	
	Oponente do dedo mínimo	Oposição do dedo mínimo (articulação CMC)	

Interfalângica Distal (IFD) têm apenas 1 grau de liberdade traduzido no movimento de flexão ou extensão. A articulação Metacarpofalângica (MCF) possui 2 graus de liberdade. A Tabela 2 contém informações sobre restrições de movimento para cada falange, as informações foram extraídas de [1, 13, 14].

Tabela 2 – Relação entre articulação e restrição de movimento.

Articulações	Abdução (graus)	Adução (graus)	Extensão (graus)	Flexão (graus)
Metacarpofalângica (MCF)	0-20	0-20	0-40	85-100
Interfalângica Proximal (IFP)	-	-	-	90-120
Interfalângica Distal (IFD)	-	-	-	80-90

Outro aspecto relacionado na restrição dos movimentos das articulações Os músculos envolvidos na movimentação dos membros da mão são classificados em dois grupos: músculos extrínsecos e músculos intrínsecos, [13, 14]. A combinação da ação destes músculos gera os movimentos que se pretende monitorar neste trabalho. Músculos **intrínsecos** são responsáveis pelos movimentos de coordenação motora fina da mão, ou seja, pelos movimentos com maior precisão. Músculos **extrínsecos** tem ação primária nos dedos 1 a 5, conforme descreve [14]. Os músculos intrínsecos são divididos em três principais grupos: tenares, palmares profundos e hipotenares. Tenares agem no polegar, enquanto que, palmares profundos são responsáveis por movimentos mais complexos com recrutamento de múltiplos músculos. Já os músculos hipotenares agem principalmente nos movimentos do dedo 5.

2.1.1 Modelo cinemático

A cinemática, na robótica, estuda a posição e velocidade de um manipulador. Para descrever a postura, formato que elos e juntas assumem em um instante de tempo, pode-se recorrer as notações e parâmetros de Denavit-Hatenberg. O primeiro modelo apresentado é o modelo cinemático de um dedo. O dedo da mão humana é formado por três articulações, cada área pontilhada na Figura 2 representa uma articulação. A articulação MCF, por possuir 2 graus de liberdade, é representada por duas juntas ortogonais, para representação dos movimentos de abdução, adução, flexão e extensão. As articulações IFD e IFP são representadas por juntas de rotação em uma única direção, representando os movimentos de flexão e extensão.

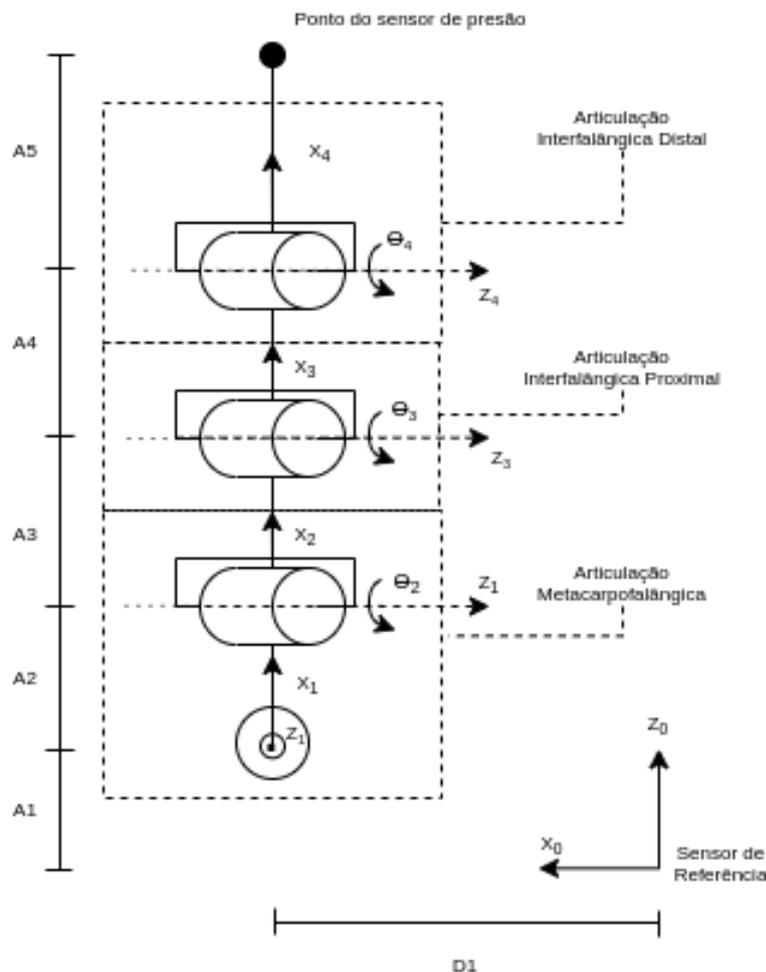


Figura 2 – Representação do modelo cinemático para um dedo da mão humana.

Para mensurar a orientação de cada articulação, e conseqüentemente a postura, serão utilizadas *Inertial Measurement Unit* (IMU) ou unidades de medição inercial. IMUs são *system on chip* (SoC) contendo um conjunto de sensores para medir aceleração, velocidade angular e a intensidade e direção do campo magnético da terra, através de acelerômetros, giroscópios e magnetômetros.

2.1.2 Orientação

De acordo com [15], para representar um corpo rígido no espaço Euclidiano são necessárias seis coordenadas. O sistema cartesiano no espaço é composto por três vetores ortonormais, ou seja, par a par o produto interno é igual a zero e cada vetor tem tamanho unitário. O sistema é representado graficamente pela Figura 3.

A representação adotada é feita através do sistema de coordenadas esféricas. Neste sistema têm-se magnitude, que corresponde a norma euclidiana da projeção da posição do corpo nas coordenadas ortonormais, o ângulo azimutal ou ângulo *theta*, no plano OXY, e o ângulo *phi* entre o vetor posição *p* e o plano OXY. A informação de magnitude não será utilizada neste trabalho, pois é conhecido o tamanho de cada falange e conseqüentemente a distância entre os sensores. A Figura 4 traz a representação gráfica no espaço deste sistema.

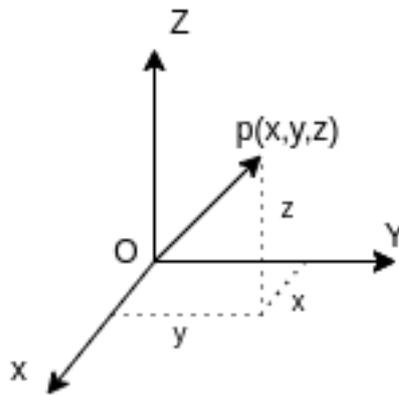


Figura 3 – Representação gráfica do sistema de coordenadas cartesianas. Fonte: Adaptado de [2].

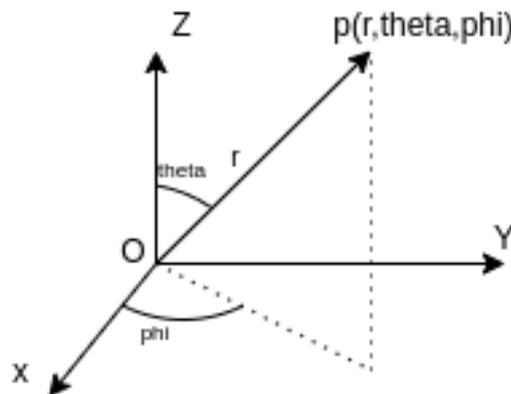


Figura 4 – Representação gráfica do sistema de coordenadas esféricas Fonte: Adaptado de [2].

Ao acoplar a IMU à mão através da luva o acelerômetro e o giroscópio fornecem dados acerca da orientação de cada falange que o sensor está localizado. Esta informação é utilizada como entrada no modelo cinemático direto da mão. Assim, para transformar estes dados na orientação de cada falange seguiu-se a nota de aplicação do fabricante [16]:

$$\theta = \arctan\left(\frac{A_X}{A_Y}\right), \quad (2.1)$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{A_Z}{\sqrt{A_X^2 + A_Y^2 + A_Z^2}}\right), \quad (2.2)$$

Onde:

- A_x é a aceleração no eixo x, Figura 4;
- A_y é a aceleração no eixo y, Figura 4;
- A_z é a aceleração no eixo z, Figura 4;
- ϕ é o ângulo utilizado para detectar movimentos de extensão e flexão do dedo;
- θ é o ângulo utilizado para detectar movimentos de abdução e adução.

De posse destas informações, ângulos ϕ e θ , é possível obter a orientação de cada sensor e, então, conhecer a postura da mão em cada instante de tempo, conforme modelo apresentado na seção anterior.

2.1.3 Filtragem dos dados

Para o projeto foi escolhido filtrar os dados das IMUs através da técnica de filtro complementar.

A IMU a ser utilizada, MPU6050, contém acelerômetro e giroscópio. Para fazer a fusão dos dados do acelerômetro e do giroscópio utilizou-se de filtro complementar.

O acelerômetro irá sofrer interferência através de forças externas relativas ao movimento dos dedos da mão, ou ainda, da movimentação do braço. Ao contrário da força da gravidade que o acelerômetro detecta, esses estímulos não são contínuos, são sinais de impulso. Sendo assim, para filtrar estes sinais um filtro passa baixas deve ser utilizado.

Para o giroscópio, este apresenta aceleração angular, em graus por segundo, integrando este sinal obtêm-se a informação desejada da orientação. Porém, este método acumula erros com o tempo. A solução, então, é utilizar um filtro passa altas.

A combinação da soma destes dois filtros em um filtro de ganho unitário é o que é chamado de filtro complementar, e a implementação mais comum é dada da seguinte forma, [17]:

$$\theta = \theta_{ac} \times (1 - \beta) + \beta \times \theta_{gir}. \quad (2.3)$$

Onde:

- θ_{ac} , estimativa de ângulo do acelerômetro;
- β , peso atribuído;
- θ_{gir} , estimativa do ângulo do giroscópio.

O peso atribuído β pode ser definido em função do tempo de acomodação, e do tempo e amostragem:

$$\beta = \tau / (\tau + \Delta t) \quad (2.4)$$

Onde:

- β peso;
- τ constante de tempo, diz respeito ao escala de tempo do ruído do acelerômetro;
- Δt tempo de amostragem.

2.1.4 Calibração

Para converter os dados medidos pelos sensores e transformá-los em informações úteis de postura e pressão faz-se necessário criar procedimentos que podem ser utilizados para atualizar o MCU acerca das características dos instrumentos de medição na luva. Durante o uso o comportamento dos sensores e das IMUs pode mudar, devido a variáveis como desgaste mecânico, exposição a poeira, umidade e temperatura.

Para uma IMU o ideal é que todos os 3 eixos de aceleração sejam ortogonais entre si, assim como, também, nos eixos do giroscópio. Desta forma é possível medir a aceleração e a velocidade angular em cada eixo independentemente [18]. Diferente do esperado, os dois conjuntos de eixos podem estar desalinhados. Quanto ao sensor de pressão, seja por conta do processo de fabricação ou desgaste mecânico, faz-se necessária levantar a curva de calibração que corresponde a uma função que deve mapear os valores capturados pelo conversor ADC (Analog to Digital Converter) em informação da pressão sobre sensor.

2.2 Protocolo I2C

Protocolo I2C é um protocolo de comunicação síncrono e *halfduplex*. É constituído por 2 fios, *serial data* (SDA) e *serial clock* (SCL). Neste protocolo há dois tipos de dispositivos que se conectam ao barramento, conhecidos como dispositivo mestre e dispositivo escravo. É possível que exista mais de um dispositivo do tipo mestre, entretanto, não é comum. O dispositivo mestre é responsável por fazer requisições de dados através da linha SDA e gera o clock para a comunicação na linha SCL, e também, finaliza a comunicação com algum dispositivo acoplado ao barramento.

A especificação [19] traz definições acerca do protocolo. Os níveis lógicos dependem dos dispositivos *master* e *slave*. Toda comunicação começa com uma condição de *START*, linha SCL em nível lógico alto quando houver uma transição de nível de tensão lógico alto para nível de tensão lógica baixo, e termina com uma condição de *STOP*, linha SDA permuta nível lógico de tensão baixo para alto enquanto SCL permanece em nível alto. As linhas SDA e SCL Conectadas ao pólo positivo de uma fonte de alimentação, com um resistor de *pull-up* por exemplo.

No modo padrão as linhas podem transferir até 100 kbit/s, outros modos permitem comunicação de até 3.4 Mbits/s, a depender da capacitância das linhas e dos dispositivos conectados.

Como a comunicação depende da sincronia entre as linhas de comunicação a capacitância entre as linhas tem efeito na temporização do protocolo. Um resistor de *pull-up* pode ser dimensionado para evitar atrasos na linha. A capacitância nas linhas é a capacitância somada das trilhas ou fios mais a capacitância das conexões e dos pinos.

2.3 Estado da arte

O desenvolvimento de uma luva eletrônica começa, ainda, na década de 1990 sendo um dos artigos mais citados, através da base *Connected papers*, [20], trás o uso da luva eletrônica como provável sucessor do goniômetro, aparelho utilizado para medir a extensão do movimento angular das articulações. O projeto desenvolveu uma luva eletrônica com o uso de sensores ópticos, o primeiro projeto do tipo, [3] e protótipo na Figura 5. De acordo com Sturman [21], os primeiros trabalhos consistiam nas estratégias de uso de sensores ópticos, sensores ultrassom e sensores magnéticos. Ainda em visão computacional grupos desenvolviam tecnologias baseada em marcadores com LEDs no *MIT MEDIA LAB*. Em revisões mais recentes na literatura, como a de [22] e [11] há uma divisão nos tipos de abordagem para o sensoriamento da mão. As abordagens mais encontradas na literatura são: através da visão computacional ou combinando sensores ativos e passivos.

Na área de visão computacional utiliza-se de câmeras de vídeo para processamento



Figura 5 – Sayre Glove, um dos primeiros projetos de luva eletrônica com sensores acoplados . Fonte: [3].

de imagens. O processo segue as seguintes etapas: aquisição de dados, pré-processamento (geralmente envolve binarização da imagem), segmentação (pode ser realizada aplicando a derivada na imagem, para destacar objetos), extração de características e classificação [11]. Esta sequência de operações é repetida para cada quadro.

Em trabalhos mais recentes, há a combinação de várias fontes de sensores tais como acelerômetros, giroscópios, sensor de força e sensor de flexão. Em [13] são utilizados 47 sensores: acelerômetros, sensores de flexão e pressão em um circuito flexível.

Outros autores em [23] adotaram uma estratégia diferente, fazendo uso de etiqueta RFID(Radio Frequency Identification) passivas com frequência de operação de 915 MHz. Neste método não há necessidade de nenhum outro circuito acoplado ao corpo ou luva, sendo que a etiqueta repete o sinal enviado por uma antena com o seu próprio código de identificação e, através do sinal recebido, mede-se a fase, o desvio causado pelo efeito Doppler e a indicação de nível de sinal (RSSI), permitindo identificar a movimentação da etiqueta em relação ao dispositivo de comunicação enquanto envia o sinal. O objetivo principal de [23] é o reconhecimento de gestos, identificados através de um modelo de redes neurais artificiais, atingindo uma acurácia de 98%.

Enquanto que na academia o desenvolvimento está concentrado em tecnologia assistida e reconhecimento de gestos para interface humano-máquina no mercado há dois segmentos, realidade aumentada e video-games [24], a Tabela 3 e as Figuras 6 trazem um comparativo acerca de alguns dos modelos encontrados no mercado com o características de: nome do dispositivo, tipo de sensores, quantidade de sensores, taxa de amostragem, tipo de conexão com interface externa, material utilizado na luva, resolução para a orientação em graus, custo(em dólar, devido ao fornecimento deste produto ser feito por empresas estrangeiras) e um *link* direcionado a página do fabricante.

A estratégia mais comumente encontrada é com uso de IMUs ou fusão de IMUs com sensores de flexão. A taxa de amostragem varia de 10 a 400 Hz e os tipos de conexão

Luva	Tipos de sensores	Quantidade de sensores	Taxa de amostragem(Hz)	Conexão	Material	Resolução orientação (°)	Custo (US\$)	URL
5DT data glove	Fibra ótica e sensores de flexão	5	60	USB, RS 232	tecido lycra preto	-	2990-5495	[25]
VMG 8	IMU	5	10 - 100Hz	Bluetooth e USB	-	ROLL: $\pm 0.01^\circ$, PITCH: $\pm 0.01^\circ$, YAW: $\pm 0.05^\circ$	500	[26]
CyberGlove® II	Sensor de flexão	18-22	90	Wireless~2.4 GHz	-	1°	1375	[27]
Xsens glove	Sensor de flexão e IMU	11	90	USB-C, BLE	77% Polyester, 23% spandex	2.5	4999	[28]
CaptoGlove – Pair	Sensores de flexão e IMU	6	-	BTLE	-	1	225	[29]
Smartgloves	IMU	7	400	Wi-Fi 2,4 5 Ghz	Poliamida, couro e Spandex	1	995	[30]
Perception Neuron Studio Gloves	IMU	6	90-240	Wi-Fi	-	0.02	1499	[31]

Tabela 3 – Modelos de luvas eletrônicas encontradas no mercado. Fonte: elaborado pelo autor.

mais adotados são com *Bluetooth* e Wi-Fi. A resolução das luvas encontradas, em graus, varia entre 2.5° (Figura 6d), 1° (Figuras 6c, 6e e 6f) e 0.01° (Figura 6b).

Para o material da luva são utilizados tecidos que conferem uma característica elástica sendo estes geralmente: poliamida, *lycra*, *spandex* e poliéster. O uso deste tipo de tecido favorece embarcar os circuitos além de servir para diferentes tipos de mãos.



(a) 5DT.



(b) VMG 8.



(c) CyberGlove II.



(d) Xsens glove.



(e) CaptoGlove – Pair.



(f) Smartgloves.



(g) Perception Neuron Studio Gloves.

Figura 6 – Imagens de produtos relacionados a luvas eletrônicas encontrados no mercado.

3 Materiais e Métodos

3.1 Solução

No intuito de monitorar a orientação de cada falange e medir com a força exercida ao segurar algum objeto foi decidido usar IMUs e sensores de força. A Figura 7 mostra um diagrama de alto nível dos componentes da luva eletrônica constituída de onze IMUs (duas em cada dedo e uma de referência na palma da mão), cinco sensores de força e uma unidade de processamento. Neste trabalho será apresentada a prova de conceito para monitorar os movimentos de um dedo, ou seja, empregando duas IMUs na falange proximal e medial e um sensor de força na ponta do dedo. É importante salientar que o software embarcado na unidade de processamento foi desenvolvido para ser facilmente escalável para cinco dedos.

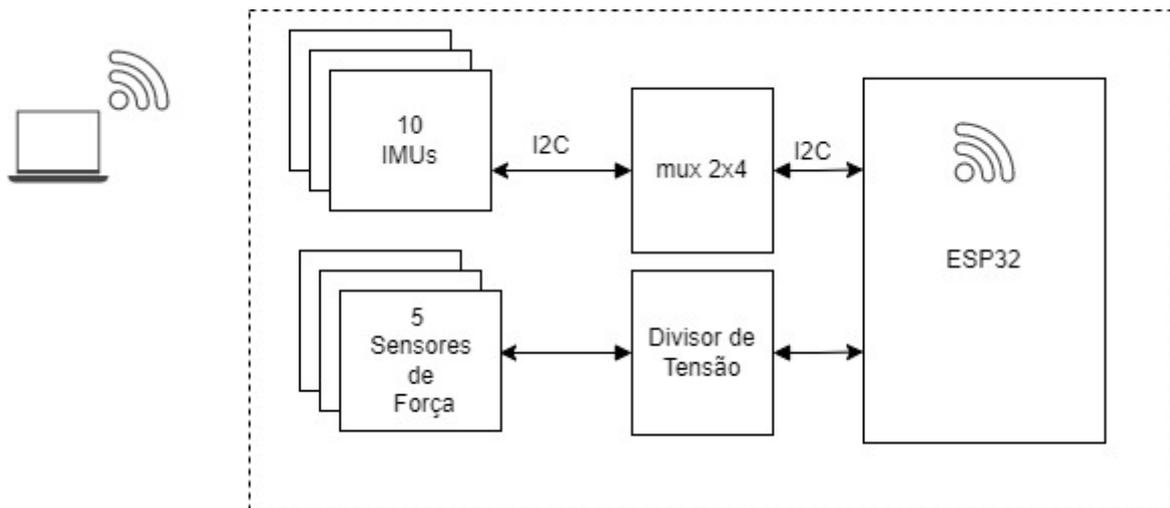


Figura 7 – Diagrama de alto nível do projeto. Fonte: elaborado pelo autor. Software: DRAW.IO.

Os acelerômetros são conectados a uma unidade de processamento através do barramento I2C. Este protocolo foi escolhido por necessitar de menos canais de comunicação entre o microprocessador e o sensor. Entretanto, os sensores adquiridos possuem uma limitação de apenas dois endereços no barramento I2C [32], de forma que foi necessário usar multiplexadores para direcionar os sinais de dados (SDA) de interesse à unidade de processamento. Nesse sentido, a unidade de processamento atualiza o canal conectado ao *master* do barramento I2C, selecionando o canal no MUX antes de realizar a leitura nos registradores da IMU.

A unidade de processamento, após coleta de dados, realiza a comunicação através de *wireless fidelity*(Wi-Fi) utilizando o protocolo *User Datagram Protocol*(UDP) via *so-*

ket, operando como servidor, este protocolo foi escolhido por não haver sobrecarga para abrir, manter e encerrar uma conexão e ter um pacote menor o que implica em um menor consumo de memória. Outro ponto da escolha de uma comunicação sem fio é por permitir um melhor aproveitamento do espaço na luva, pois, não há a necessidade de incluir cabos facilitando o embarcamento da solução eletrônica na luva.

Um computador de escritório coleta os dados e os armazena em um arquivo para posterior análise. Os pacotes são compostos pela informação da orientação de cada falange monitorada com relação ao sensor posicionado na mesma placa da unidade de processamento, mais a indicação de leitura dos sensores de força.

3.2 Hardware

A partir do modelo cinemático da Figura 2 foi feito um planejamento da posição para os sensores. As IMUs são alocadas ao centro das falanges mediais e proximais. O sensor de pressão é posicionado na falange distal, no mesmo plano da palma da mão. A Figura 8, ilustra o *setup* proposto.

A unidade de processamento escolhida foi a plataforma ESP32 (ESP32 DEVKIT-C) por ter módulos de comunicação Wi-Fi e Bluetooth integrados. Conforme informado no *datasheet* da ESP32 [33], o microcontrolador possui dois conversores de dados ADC, sendo que, um deles, o ADC2, é um módulo compartilhado entre a comunicação Wi-Fi e os pinos GPIO. Segundo a documentação da ESP32 [34], é possível que a função `adc2_get_raw`, que retorna o valor do conversor, bloqueie a execução do Wi-Fi ou do conversor até que o recurso seja liberado. Com essa restrição em mente foi escolhido o canal referente ao ADC1, localizado nos pinos VP, VN, D32, D34, D33, D35. Para os mestres I2C foram escolhidos os pinos d23(SDA1), d22(SCL1), d19(SCL2) e d21(SDA2).

A comunicação com protocolo I2C permite a conexão de vários dispositivos no mesmo canal de comunicação, entretanto, grande parte das IMUs de baixo custo do mercado possui uma limitação relacionada ao endereçamento, possuem apenas dois endereços possíveis alternando-se um sinal de controle que modifica o bit menos significativo que representa o endereço.

Para contornar este problema, foi proposto e implementado uma solução de multiplexação do canal de comunicação do protocolo I2C no tempo.

O multiplexador escolhido foi o 74HC4052E, pois permite a multiplexação de dois canais simultaneamente, assim, é possível que se utilizem os dois mestres da ESP32 para realizar leituras dos sinais analógicos.

Este SoC contém dois multiplexadores/demultiplexadores analógicos de duas entradas e quatro saídas. Com o mesmo sinal de controle, simultaneamente, seleciona-se o

canal em que cada mestre está conectado. O Apêndice, ilustra esta configuração C.

Conforme as considerações acima elencadas foi produzida uma placa de circuito impresso (PCB) projetada através do software EAGLE e enviada para fabricação na empresa PCB BRASIL. O objetivo principal dessa placa de aquisição é integrar em uma área menor à palma da mão os conectores dos barramentos I2C, os conectores dos sensores de força, o circuito multiplexador de dados, a ESP32 e os circuitos de alimentação. A placa foi produzida em duas camadas como mostrado na Figura 9. O diagrama esquemático da placa pode ser observado no Apêndice C.

Os sinais no esquemático correspondem a:

- D1, sinal de força relativo ao dedo 1;
- D2, sinal de força relativo ao dedo 2;
- D3, sinal de força relativo ao dedo 3;
- D4, sinal de força relativo ao dedo 4;
- D5, sinal de força relativo ao dedo 5;
- SDA1, sinal de dados da comunicação I2C do mestre 1 da ESP32;
- SDA2, sinal de dados da comunicação I2C do mestre 2 da ESP32;
- A, bit mais significativo do sinal de controle do multiplexador;
- b, bit menos significativo do sinal de controle do multiplexador;
- SCL1, clock da comunicação I2C do mestre 1 da ESP32;
- SCL2, clock da comunicação I2C do mestre 2 da ESP32;

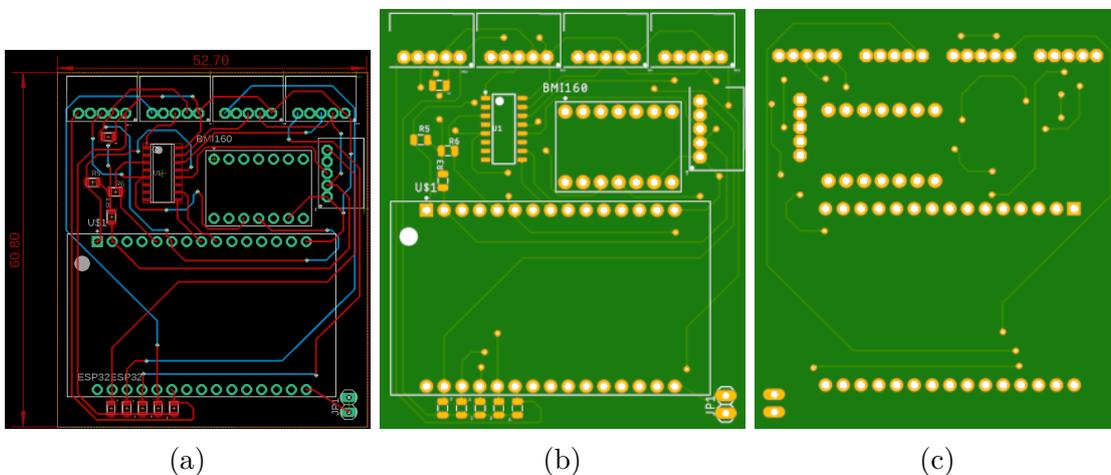


Figura 9 – Projeto da PCB da placa de aquisição. (a) Roteamento da placa de circuito impresso. (b) Vista da camada superior. (c) Vista da camada inferior

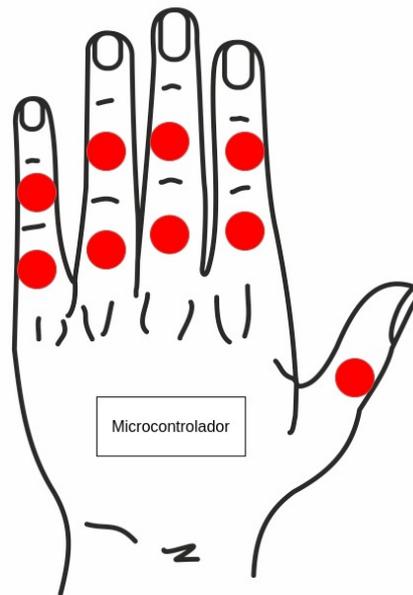


Figura 8 – Organização dos componentes na luva demonstrado em um desenho de uma mão humana. Pontos vermelhos indicam localização das IMUs. Os sensores de pressão são localizados nas pontas dos dedos no local onde existem as digitais. Fonte: elaborado pelo autor. Software: DRAW.IO.

3.3 Software Embarcado

Para representar os dados que a luva capta foram criadas 4 estruturas de dados,

- *raw_data*;
 - *int accelx*, aceleração no eixo x;
 - *int accely*, aceleração eixo y;
 - *int accelz*, aceleração eixo z;
 - *int gyrox*, aceleração angular, eixo x;
 - *int gyroy*, aceleração angular, eixo y;
 - *int gyroz*, aceleração angular, eixo z;
 - *int master_num*, número do mestre que fez a leitura (para ajudar a identificar problemas com a solução);
 - *int finger*, representa de qual dedo está sendo realizada a leitura.
- *orientation*;
 - *float phi*, ângulo que representa o movimento de extensão e de flexão;
 - *float theta*, ângulo que representa o movimento de adução e abdução;

- *finger*, cada estrutura de *finger*, contém a estrutura de *orientation* :
 - *orientation proximal*; orientação da falange proximal;
 - *orientation medial*, orientação da flange medial;
 - *orientation distal*, orientação da falange distal;
 - *orientation metacarpophalangeal*, orientação da articulação metacarpofalângica;
 - *float pressure*, pressão exercida na ponta do dedo;
- *Glove*, Estrutura que embarca os dados da luva:
 - *finger fingers[5]*, array com cinco estruturas de *finger*;
 - *orientation frame_reference*, orientação do frame de referência localizado nas costas da mão.;

Todo o projeto foi desenvolvido na plataforma ESP32, rodando o sistema operacional *Real Time Operational System* (RTOS), através da ferramenta Espressif IoT Development Framework (esp-idf). A estratégia consiste em maximizar o uso de recursos pelos dois núcleos da ESP32. Conforme o *datasheet* [33] a ESP32 possui dois mestres I2C para comunicação podendo estes serem direcionados em quaisquer portas *General Purpose Input Output*(GPIO) do módulo, salvo restrições de projeto.

A solução consiste em criar *tasks* para dividir o problema. Cada tarefa (task) representa um aspecto do projeto tais como comunicação entre microcontrolador e plataforma externa, controle da multiplexação dos canais e leitura dos registradores de cada IMU em cada canal. Foram criadas cinco *tasks*:

- *sync_task*: gerencia as sequências de leituras ao acionar através do GPIO qual canal do MUX o sinal de dados SDA estará conectado e os eventos que tiram do estado de bloqueio as tarefas de leitura dos canais I2C;
- *i2c_task0*: responsável por realizar as leituras e calcular as respectivas orientações de cada sensor;
- *i2c_task_reference_frame*: responsável por computar os dados do frame de referência localizado na mesma placa da ESP32 e calcular as orientações;
- *udp_server_task*: realiza a comunicação externa;
- *disp_buf*: realiza a troca de informações com uma interface de monitoramento, útil para *debug*.

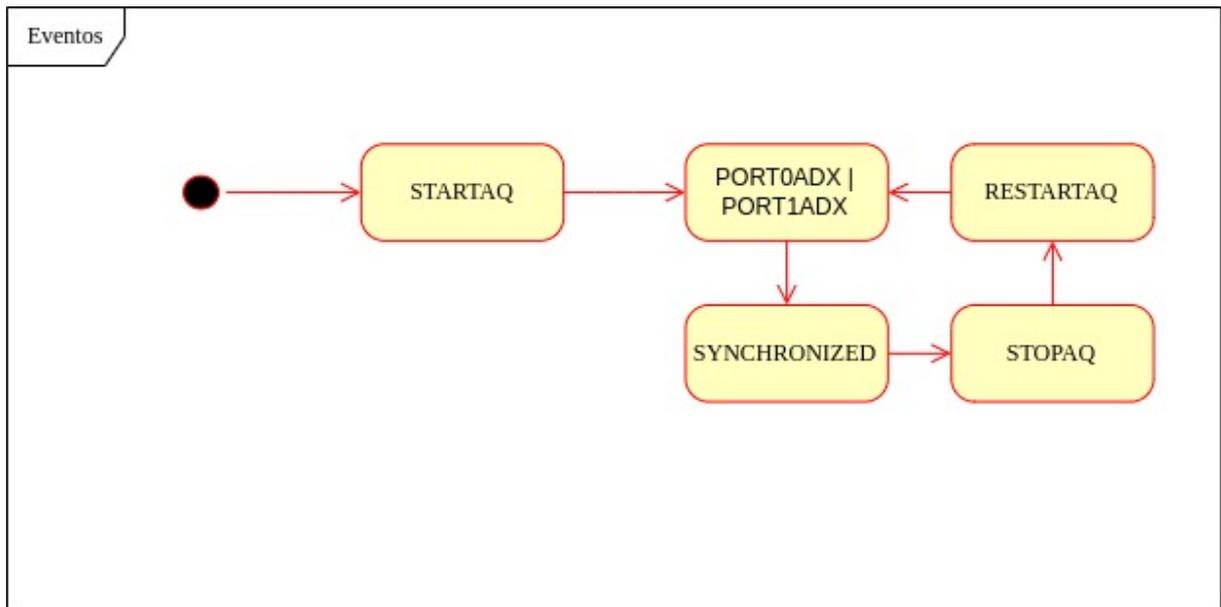


Figura 10 – Fluxograma representando o acionamento dos eventos que controlam o comportamento das tarefas. Fonte: elaborado pelo autor. Software: DRAW.IO.

A sincronização destas tarefas é feita através de eventos em grupo ou *EventGroup*. No *FREE RTOS*, *bits* de eventos são utilizados para indicar a ocorrência de um evento, sendo possível bloquear uma tarefa pela espera de um evento ou conjunto de eventos por um tempo pré-determinado. Foram definidos quatro eventos que determinam as tarefas executadas pelo dispositivo.

- STARTAQ, início da aquisição de dados;
- SYNCHRONIZED, as duas *tasks* de leitura dos canais terminaram suas tarefas com êxito;
- STOPAQ, pausa a aquisição de dados;
- RESTARTAQ, recomeça a aquisição de dados.

Outros eventos intermediários são os seguintes:

- PORT0ADX, ler dados no canal A do multiplexador;
- PORT1ADX, ler dados no canal B do multiplexador;
- PORT0ADX_SYNCHRONIZED, acionado pela *task* de leitura do MASTER 0 após ler os dados de um canal;
- PORT1ADX_SYNCHRONIZED, acionado pela *task* de leitura do MASTER 1 após ler os dados de um canal;

A Figura 10 representa o fluxo do software. Inicialmente, no estado STARTAQ, as *tasks i2c_task0* e *i2c_task0* são bloqueadas e aguardam pelo evento de sincronismo que representa o acionamento de um novo canal no multiplexador.

As tarefas *i2c_task0* e *i2c_task_reference_frame* em sua primeira execução inicializam buffers e variáveis, e entram em modo de bloqueio. Para que uma amostragem ocorra as tarefas esperam pelos eventos PORT1ADX e PORT0ADX, respectivamente. E, então, tomam os dados da IMU conectada àquele canal, calculam e atualizam a estrutura de dados que representa a luva, acionam o evento SYNCHRONIZED (quando as duas tarefas para leitura I2C terminam a execução) e entram em estado de bloqueio. O processo de amostragem é controlado pela tarefa *sync_task* que define um tempo de espera, para que, as tarefas que compartilham os dados da luva e as tarefas responsáveis pela coleta de dados dos canais I2C terminem a execução.

A plataforma ESP-IDF contém a abstração de componentes, onde, cada componente representa um módulo ou objeto. Separando-se, desta forma, as atribuições no código. A organização do projeto de software seguiu o padrão da plataforma IDF, os componentes do projeto foram definidos como: MISC, I2C e *orientation_estimate*. No componente MISC estão as definições do conversor analógico para digital e do GPIO que controla o MUX. Para o componente I2C foram definidas configurações do driver *i2c* tais como: pinos da esp32 que cada mestre tem acesso, frequência da linha de clock (SCL) e as seguintes funções,

- *i2c_master_init*: Configura e inicializa o mestre da comunicação;
- *i2c_imu_setup_reference*: Configura a IMU de referência, pois, é um dispositivo diferente do utilizado nos dedos;
- *i2c_imu_setup*: Configura a IMU;
- *i2c_master_read_slave*: Realiza leitura dos registradores na comunicação I2C;
- *i2c_master_write_slave*: Realiza operação de escrita na comunicação I2C.
- *initialization*: inicializa os componentes I2C e seus respectivos parâmetros de funcionamento para o projeto.

No trabalho foi

3.3.1 Materiais e Custos

O custo de fabricação da luva, assim como os materiais utilizados estão elencados na Tabela 4.

Tabela 4 – Custo de material para a produção de uma luva.

Produto	Qtd	Subtotal
Placa circuito impresso	1 unidades	60,00
Sensor IMU 6050	10 unidades	120,69
Sensor IMU 9250	1 unidades	29,14
Conector Placa-Cabo PHMN4-05 Vias	5 unidades	2,60
Conector Placa-Cabo PHF4-05 Vias	5 unidades	1,20
Precisão 0805 1% 10 KOhms	4 unidades	0,36
Precisão 0805 1% 47 KOhms	5 unidades	0,45
Esp32 dev kit C S2	1 unidades	57,56
CABO FLAT 10X28AWG - 10 VIAS	50 centímetros	0,55
Sensor de pressão	5 unidades	315,83
Luva Ciclismo tamanho GG	1 unidade	100,00
Total		688,38

A lista de materiais utilizados está elencada na Tabela 5.

Tabela 5 – Materiais utilizados nos testes para configuração com um dedo.

Materiais
Protótipo Luva eletrônica
DIR-819 Roteador Wireless AC750
Notebook ACER NITRO 5 AN515-52
Smartphone Redmi 10s
Apoio tripé
bola de ping-pong cor laranja
mouse acer predator NP.MCE11.005
caneta esferográfica de cor azul
papel a4
fita adesiva colorida amarela

4 Resultados

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos através da aplicação do protocolo experimental com o protótipo desenvolvido. Para todos os experimentos foi feita uma análise de postura do dedo, comparando os dados obtidos e transmitidos ao computador, visualizados na ferramenta gráfica, com o respectivo vídeo de realização do experimento.

4.1 Protocolos de Teste

Para utilizar o sensor de força foi feito um experimento de caracterização da relação tensão por força aplicada ao sensor. O experimento utilizou-se dos materiais:

- Balança digital HAÜSKRAFT com 1 g de precisão;
- Sensor FSR;
- conjunto cone e parafuso;
- seringa de 20 mL;
- placa da luva;
- osciloscópio Tektroniks TDS 2012.

O método utilizado consistiu em duas etapas: avaliar a partir de quantas gramas o sensor começa a apresentar uma resposta e aproximar uma função que descreva o comportamento ao ser submetido a uma determinada força. Através do uso de um conjunto cone parafuso equilibrou-se uma forma na base do sensor. Com o auxílio de uma seringa graduada adicionou-se 25 gramas de água, tomou-se a quantidade de 199 amostras da tensão elétrica no circuito divisor de tensão do sensor e então armazenou-se estes dados em um arquivo com extensão *Comma-separated values*(CSV), o que correspondeu a 10 segundos de amostragem. O processo foi repetido de 25 gramas em 25 gramas até que atingi-se o valor de 500 gramas. Todos os arquivos gerados foram tratados com scripts no MATLAB, obtendo-se a média e desvio padrão de cada amostra. Após a coleta e computo dos resultados, foi feita regressão em uma função do tipo exponencial com dois coeficientes que possa ser utilizada para transformar os dados do sensor FSR, medidos no circuito como tensão, em força. A Equação 4.1 trás o modelo utilizado para regressão e a Equação 4.2 a função a ser utilizada pela ESP32 para traduzir os dados coletados de tensão em força, esta consiste em uma manipulação algébrica da Equação 4.1.

$$V(f) = a * \exp^{-b*f} \quad (4.1)$$

$$f = \ln \frac{a}{V} * \frac{1}{b} \quad (4.2)$$

Onde, nas Equações 4.1 e 4.2:

- a, coeficiente;
- b, coeficiente representado a taxa de decaimento da exponencial;
- f, força peso(g);
- V, tensão em função da força aplicada.

Para efeitos de validação do protótipo de luva eletrônica foram planejados os seguintes experimentos. Todos os experimentos foram filmados usando uma câmera de celular e utilizando marcadores visuais em cada falange.

- Experimento1 - flexão e extensão de grande amplitude: Abrir e fechar o dedo três vezes tocando a palma da mão. Duração: 10 segundos.
- Experimento2 - agarre e movimentos finos: Agarre de uma caneta e escrita a baixa velocidade em um papel. Duração: 10 segundos.
- Experimento3 - agarre e movimentos bruscos: Agarre de um mouse e realização de um cliques e dois cliques com o mouse. Duração: 10 segundos.
- Experimento4 - movimentos rápidos: Digitar um teclado. Duração: 10 segundos.
- Experimento5 - pressão incremental: Pressionar um objeto com a ponta do dedo incrementando a força pouco a pouco até alcançar um valor de 300 gr. Realizar durante 10 segundos.

Para os experimentos o modelo da Figura 2 foi inicializado conforme a Tabela 6, onde os valores de θ são variáveis a serem preenchidas com a orientação calculada para cada articulação. A conversão da aceleração em ângulo segue o proposto nas Equações 2.1 e 2.2. A orientação de cada falange, é tomada com referência ao sensor localizado próximo as flanges metacarpais. O ângulo medido através dos dados de aceleração das três direções é, então, subtraído com relação ao sensor da posição anterior.

Para todos os experimentos, a configuração do acelerômetro foi feita seguindo [32], usando uma taxa de amostragem de 8kHz, medindo até 16 g. O sinal de *clock* da comunicação I2C foi definido como 400 kHz, que representa a maior frequência de transmissão suportada pelo dispositivo.

Para avaliar a consistência dos dados capturados com a luva eletrônica, foi desenvolvida uma ferramenta de visualização de elos e juntas do modelo cinemático direto em

Tabela 6 – Parâmetros de Denavit-Hatemberg para o modelo apresentado na Figura 2.

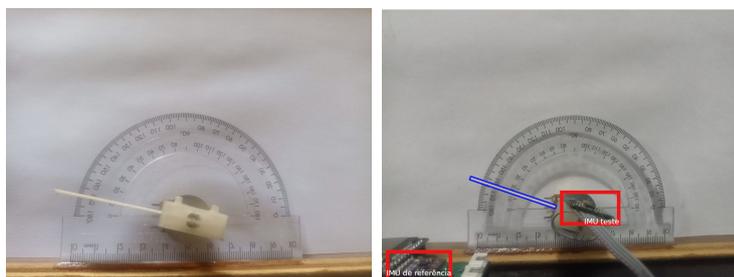
a (mm)	d (mm)	$\theta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$
0	0	θ_1	45
50	0	θ_2	0
31	0	θ_3	0
25	0	θ_4	0

MATLAB. Através desta ferramenta é possível realizar uma comparação visual, através de uma análise postural, entre o vídeo capturado durante a execução dos experimentos e o movimento realizado pela ferramenta de visualização.

O código do projeto encontra-se no repositório público em [35].

4.2 Validação do algoritmo para estimação da orientação

Para a estimação da orientação foi feita uma configuração em bancada para avaliar os dados fornecidos pela luva. A Figura 11a contém a configuração do experimento que consiste em atrelar uma IMU a um corpo de prova que por sua vez está conectado a um potenciômetro. Com o auxílio do transferidor acoplado, mediu-se o ângulo e comparou-se ao entregue pela IMU.



(a) Configuração do experimento sem a IMU. (b) Configuração do experimento completo.

Figura 11 – Montagem do experimento de verificação do ângulo informado pela IMU.
Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados são apresentados na Figura 12,

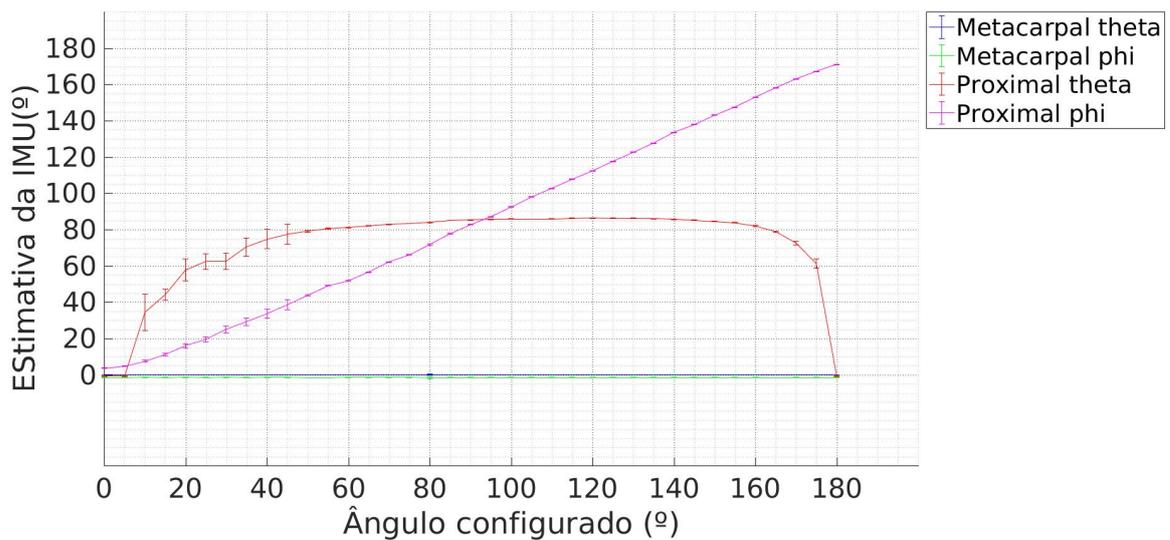


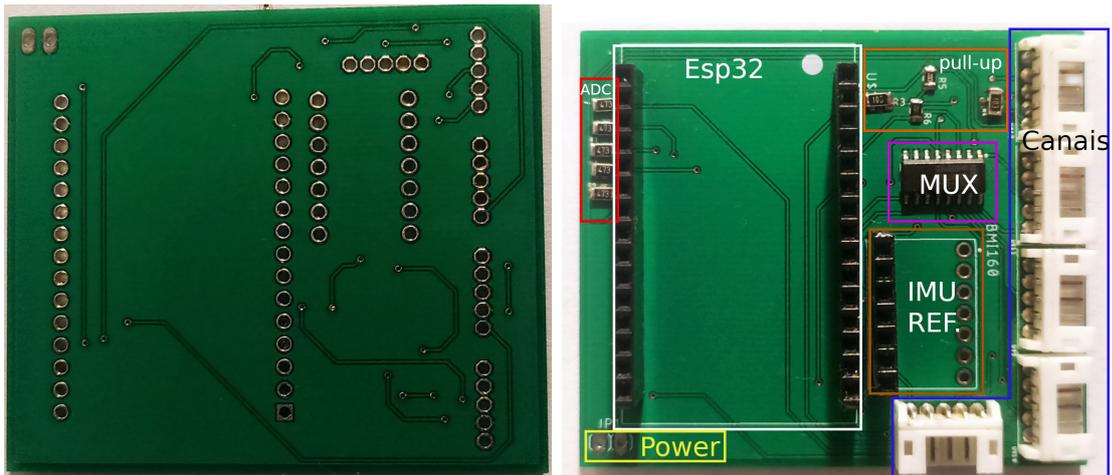
Figura 12 – Teste realizado para verificar a estimativa de ângulo que a IMU faz para as articulações de um dedo, seguindo o modelo apresentado na seção de fundamentação teórica, 2.1.1. Fonte: elaborado pelo autor. Software: MATLAB.

A linha roxa representa a IMU acoplada na configuração da Figura 11. Tomando o valor configurado para o corpo de prova e o valor medido para o experimento conduzido, obteve-se 7 graus de desvio padrão.

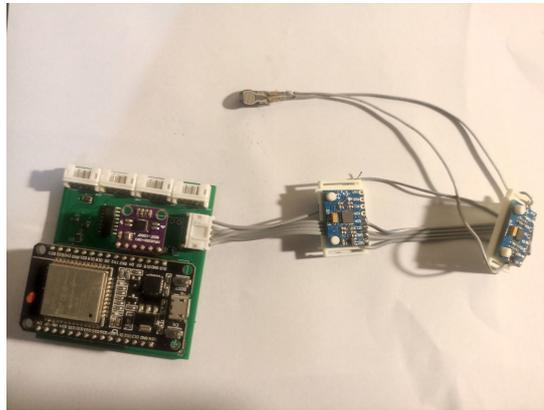
O ângulo representado pela linha vermelha, representa o ângulo que pretende-se medir a partir do movimento de abdução e adução dos dedos. A IMU em teste, por causa do acoplamento ao potenciômetro, estava rotacionada ao longo do eixo z, a aproximadamente 90° em relação a IMU de referência, como mostra a configuração do experimento na Figura 11.

A IMU que representaria a articulação MCF está em repouso na mesa, na mesma orientação da IMU de referência. A Figura 13 apresenta a construção da placa de aquisição com o destaque de cada componente integrado. Observa-se na Figura 13b a camada superior demarcada com o local dos componentes do projeto. No Figura 13a pode ser observada a camada inferior da placa, nesta camada, não optou-se por colocar nenhum componente, esta serve facilitar o roteamento. E por seguinte a placa com os componentes montados, na Figura 13c.

As Figuras 14a e 14b são o resultado da construção da luva. Cada canal é composto pelo hardware de 2 IMUs e um sensor de pressão conforme Figura 14a, eles são fixados por elásticos na posição adequada à falange. A caixa preta é presa pelo elástico e contém o microcontrolador e a placa desenvolvida no projeto.

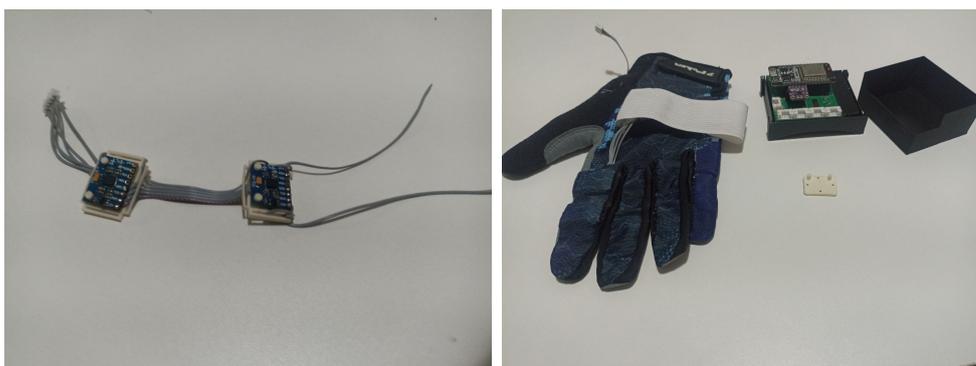


(a) Placa de aquisição, camada inferior. (b) Placa de aquisição, camada superior.



(c) Placa de aquisição montada.

Figura 13 – Placa de aquisição preparada para escalonamento da solução para cinco dedos. Fonte: elaborado pelo autor.



(a) Canal para um dedo da luva.

(b) Componentes do protótipo.

Figura 14 – Componentes e fabricação da luva eletrônica. Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 Resultados com a luva eletrônica

Conforme descrito no protocolo experimental, o procedimento de avaliação da luva eletrônica consiste em medir a postura usando a ferramenta de visualização desenvolvida

em MATLAB e sua comparação com as imagens coletadas durante a execução de cada experimento. Os resultados destes experimentos são apresentados nas seguintes subseções. Os experimentos consistem em avaliar a resposta da luva a uma combinação de movimentos bruscos ou lentos e exigem uso de coordenação motora fina ou grossa (movimentos de precisão ou não), avaliando, ainda, a pressão exercida em cada tipo de movimento ou a combinação dos movimentos. No primeiro experimento é avaliado a capacidade de representar movimentos de pouca precisão e lentos. Enquanto que no experimento 2 movimentos de precisão, porém, ainda de velocidade lenta. Já nos experimentos 3 e 4 avalia-se os tipos de movimento brusco e com menor precisão, clique no mouse, e maior precisão, digitação. No último experimento buscou-se avaliar a força exercida ao agarrar um objeto.

Nas seguintes subseções, Figuras 16, 18, 20, 22 e 24, cada ponto dos gráficos corresponde a uma amostra, enquanto que na Figura ao lado, a representação no tempo da postura do dedo.

Como comentado na seção de fundamentação teórica, o modelo cinemático utilizado é descrito com base nas técnicas de modelagem e descrição de manipuladores de braço robótico, por tanto, em todos os gráficos que representam a postura, existem os seguintes elementos: juntas, elos e eixos de orientação. As juntas representam as articulações, enquanto que os elos, linhas pretas, representam as falanges. Os eixos, traços em vermelho e verde, representam a orientação em cada junta. É a partir do ângulo entre estes eixos de que se descreve a posição de cada elo e orientação de cada articulação, obtendo-se, assim, a postura da mão ao longo do tempo.

4.3.1 Experimento 1: Flexão e extensão de grande amplitude

Na Figura 15 observa-se o arranjo realizado para o teste. Na Figura 15a a mão é posicionada em repouso na superfície da mesa por um período para estabelecer um ponto de referência para o início da movimentação. Já nas Figuras 15b a 15d são as posições que repetidas até o fim do período de amostragem.

Já com o protótipo da luva, com um canal conectado, dedo 1, gerou-se a Figura 16,

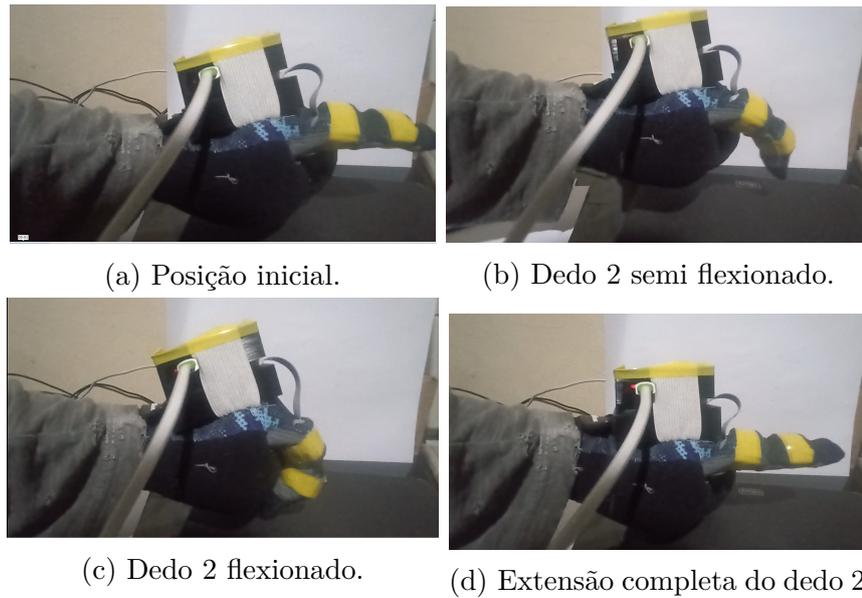


Figura 15 – Sequência utilizada para captura de movimento de flexão para o dedo 2. Fonte: elaborado pelo autor. Vídeo disponível em: <https://youtu.be/cOSMikrNFPA>.

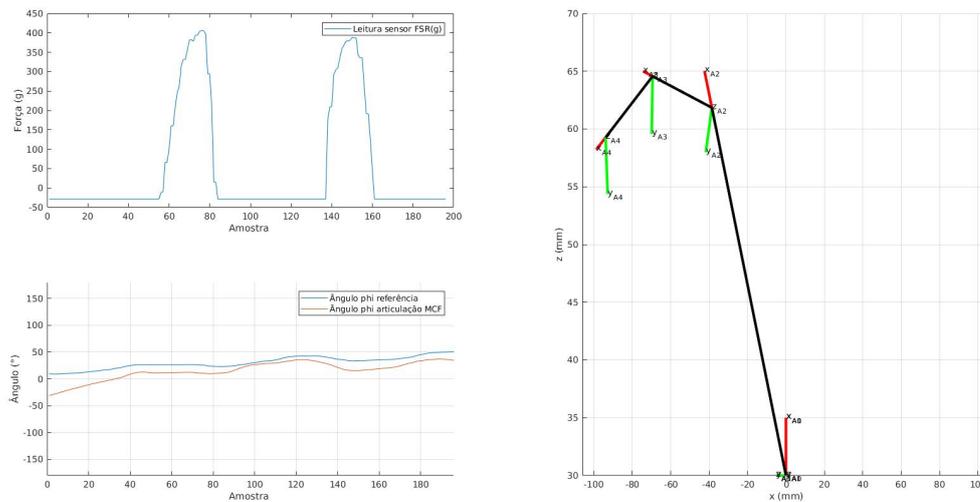


Figura 16 – Experimento de flexão e extensão do dedo representado pelos cálculos dos parâmetros de Denavit-Hatzenberg, com o protótipo da luva. Na figura à esquerda, representação lateral Software: MATLAB.

Na Figura 16 há três gráficos: pressão do sensor na ponta do dedo (canto superior esquerdo), ângulos phi das juntas MCF e IFP e no canto direito uma representação gráfica da posição utilizando a notação de Denavit-Hatzenberg.

Ao realizar o experimento e visualizar os dados, observou-se que as informações de postura no gráfico condizem com o observado no gráfico do canto inferior esquerdo (monitoramento dos ângulos ϕ e θ). Assim, como, a força exercida ao tocar o dedo na palma da mão, etapa demonstrada na Figura 16.

4.3.2 Experimento 2: agarre e movimentos finos



Figura 17 – Imagem capturada a partir do vídeo do experimento de agarre e movimentos finos. Fonte: elaborado pelo autor. Vídeo do experimento disponível em: <https://youtu.be/uwbtWcrSnn8>.

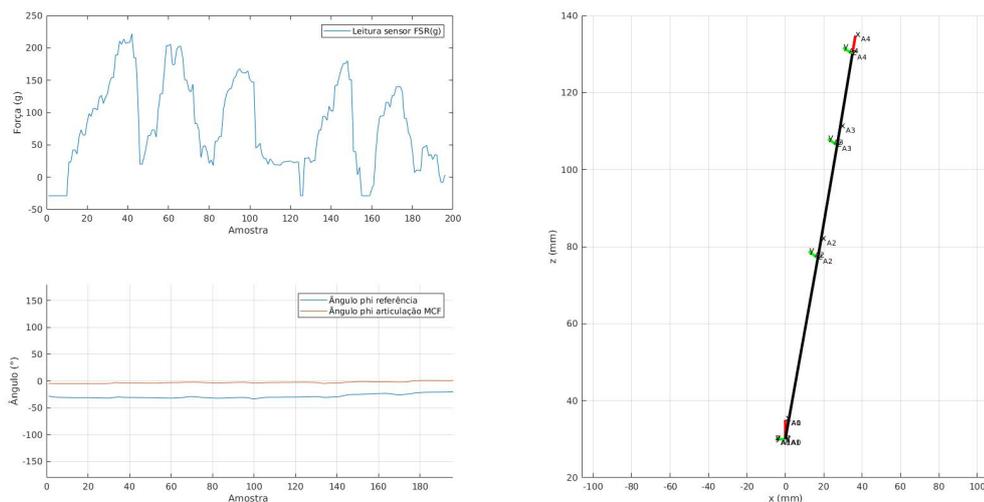


Figura 18 – Representação da pressão exercida sobre o sensor (gráfico no canto superior esquerdo), representação dos ângulos em relação a IMU de referência (canto inferior esquerdo) e ilustração do movimento em gráfico ao longo do tempo (gráfico à direita). Fonte: autoria própria. Software: MATLAB.

Como demonstrado anteriormente no experimento de caracterização da IMU, o erro associado às medidas é de aproximadamente 7° . Ao verificar o experimento no vídeo, Figura 17, em contraste com os dados apresentados em gráficos, Figura 18, observou-se pouca representação aos movimentos, considerando ainda, que a configuração da luva continha apenas um canal. Quanto ao sensor FSR, este apresentou uma resposta mais discernível a pressão exercida por segurar a caneta nos diferentes movimentos de escrita realizados.

4.3.3 Experimento 3: agarre e movimentos bruscos



Figura 19 – Imagem capturada a partir do vídeo do experimento de agarre e movimentos bruscos. Fonte: autoria própria. Vídeo do experimento disponível em: <https://youtu.be/fsFui6n-vYU>.

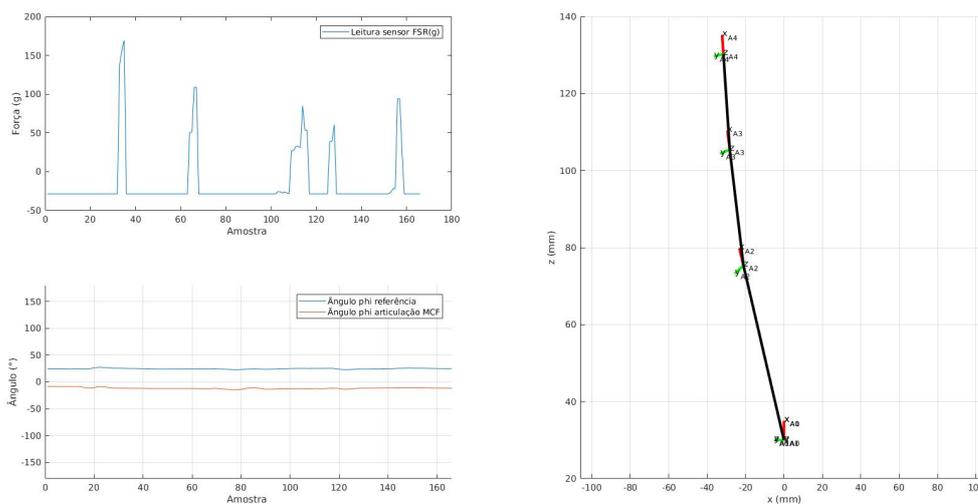


Figura 20 – Demonstração gráfica dos dados coletados para o experimento de agarre e movimentos bruscos. Representação da pressão exercida sobre o sensor (gráfico no canto superior esquerdo), representação dos ângulos em relação a IMU de referência (canto inferior esquerdo) e ilustração do movimento em gráfico ao longo do tempo (gráfico à direita). Fonte: autoria própria. Software: MATLAB.

Para avaliar a condição de movimentos rápidos, como explicitado anteriormente acerca dos experimentos, foi realizado o experimento de cliques em um mouse. A partir do vídeo e em comparação aos gráficos gerados com os dados do experimento, notou-se que houve representação e captura do momento de clique pela luva. Comparando-se ao gráfico da Figura 20, o movimento condiz com a ação de flexionar o dedo.

4.3.4 Experimento 4: movimentos rápidos

Assim como ocorreu para os experimento 2, não foi possível visualizar efetivamente a ação de toque em tecla. Entretanto, os picos de pressão capturados indicaram o toque e condizem com os pequenos movimentos capturados. Ainda que, alguns dos toques em teclas não tenham sido representados.

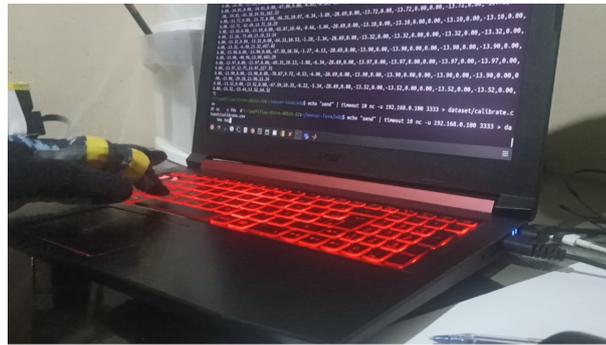


Figura 21 – Imagem capturada a partir do vídeo do experimento de digitação. Fonte: autoria própria. Vídeo do experimento disponível em: <https://youtu.be/b1A6eqT4ZsY>.

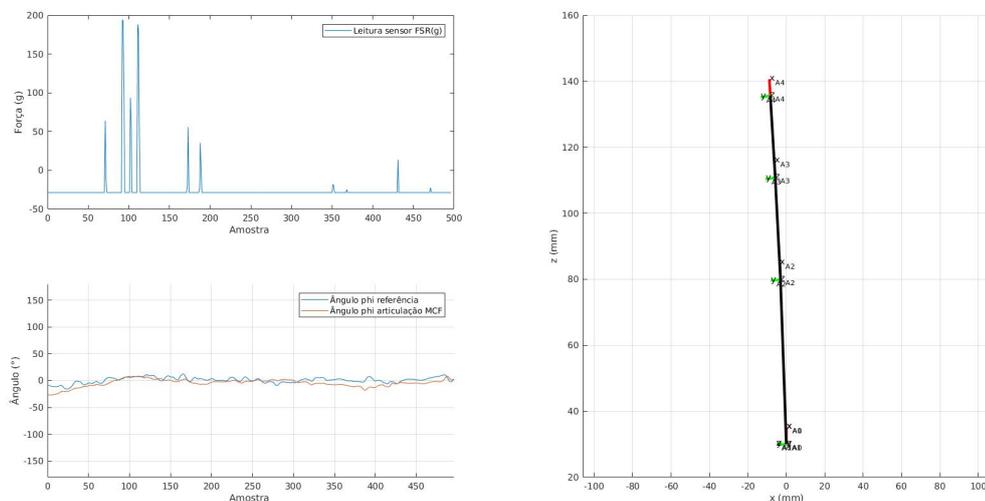


Figura 22 – Representação da pressão exercida sobre o sensor (gráfico no canto superior esquerdo), representação dos ângulos em relação a IMU de referência (canto inferior esquerdo) e ilustração do movimento em gráfico ao longo do tempo (gráfico à direita). Fonte: autoria própria. Software: MATLAB.

4.3.5 Experimento 5: pressão incremental

O objeto escolhido para esta tarefa foi uma bola de ping-pong de cor laranja. Enquanto os outros dedos da mão seguravam a bola, o dedo 1, indicador, realizou movimentos de flexão e extensão, exercendo e retirando pressão em cima do sensor FSR. Comparando

os movimentos ilustrados na Figura 24, gráfico à direita, foi possível observar a pressão exercida sobre o objeto e os movimentos de flexão e extensão, Figura 24 gráfico no canto superior à esquerda.



Figura 23 – Imagem capturada a partir do vídeo do experimento de agarre e movimentos finos. Fonte: autoria própria. Vídeo do experimento disponível em: <https://youtu.be/CQJn9AiNX8o>.

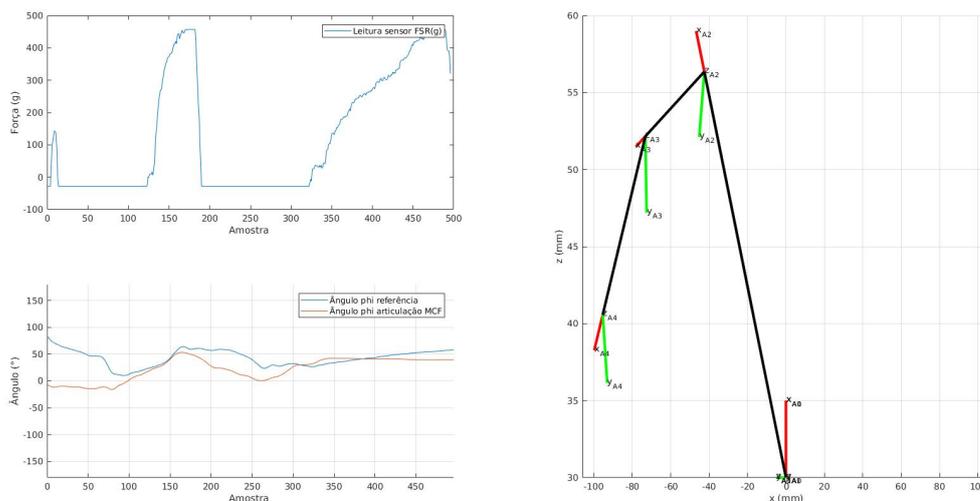


Figura 24 – Representação da pressão exercida sobre o sensor (gráfico no canto superior esquerdo), representação dos ângulos em relação a IMU de referência (canto inferior esquerdo) e ilustração do movimento em gráfico ao longo do tempo (gráfico à direita). Fonte: autoria própria. Software: MATLAB.

4.4 Testes de taxa de transmissão e desempenho

Para a conexão entre os dispositivos foi utilizado o roteador DIR-819, o roteador não foi conectado à internet, tendo, assim, apenas o computador e a ESP32, conectados. O tráfego de rede foi monitorado utilizando a ferramenta WIRESHARK, foram filtrados o tipo de protocolo, UDP, o IP da fonte, 192.168.0.100, e o IP de destino, 192.168.0.103. Uma captura de tela foi incluída no Apêndice A. Os dados capturados foram, então, salvos em

um arquivo JavaScript Object Notation (JSON) com as informações de cada pacote. No código em *Python* no repositório [35] está o *script* utilizado para ler e calcular o *throughput*, taxa de transferência dos pacotes, que, na média, corresponde a $19,64 \pm 5,30ms$. Dentro deste tempo está compreendido a aquisição e cálculo da postura mais a informação de força exercida por 1 dedo.

O computador utilizado usou sistema operacional GNU/linux Ubuntu 20.04.1 LTS e a ferramenta de conexão utilizada foi o *NetCat* com o comando utilizado foi: "nc -u 192.168.0.100 3333".

Enquanto que para o desempenho individual de cada *task* de aquisição e processamento dos dados, medidos a partir de um contador com incremento em us que começa a partir do processo de Boot, cada *task* realiza a leitura completa de um canal em aproximadamente $1,5 \pm 0,1ms$.

5 Conclusão

Neste trabalho foi possível desenvolver um protótipo que atenda a necessidade de capturar movimentos de mão humana e pressão exercida na ponta dos dedos. Os testes indicaram que o protótipo alcançou o objetivo proposto, entretanto, ficando aquém das especificações dos dispositivos encontrados no mercado. Ainda que, este utilize sensores de baixo custo observou-se que a plataforma ESP32 apresenta grande potencial para servir como microcontrolador deste projeto de instrumentação.

A plataforma forneceu comunicação com plataforma externa, possibilidade de multiplexação e paralelismo entre a aquisição e processamento dos dados. De forma a melhorar a escalabilidade da solução, outras formas de multiplexação podem ser consideradas em projetos futuros, como, por exemplo, a multiplexação do sinal de controle do endereço das IMUs.

Para os testes de movimentos bruscos, rápidos e ou lentos, o dispositivo demonstrou que consegue capturar informações da postura e pressão.

Nos experimentos foi observado que para movimentos finos o dispositivo não realizou boa representação dos dados, como demonstrado experimentalmente, apresenta um imprecisão de 7º para mais ou para menos. Quanto a pressão, o dispositivo foi capaz de detectar e mensurar o toque.

Outro problema se dá a partir da aquisição de dados para representar movimentos de abdução e adução. Como a orientação de cada IMU é baseada no vetor da força gravitacional, há um *drift*, pois, em alguns casos, o eixo z fica alinhado com o vetor da força gravitacional, como consequência, os eixos x e y, perpendiculares a z, não experimentam nenhuma força. Informação que seria utilizada no filtro complementar e que corrige este erro.

Quanto a orientação espacial, neste trabalho, adotou-se a representação cartesiana com coordenadas esféricas. E para poder calcular os ângulos utilizou-se de funções trigonométricas inversas, que a solução não é única. Outras representações como *quaternions*, [36], podem ajudar a resolver este problema. Quaternions são uma estrutura algébrica que estendem a noção de números complexos, tem sido utilizados para representar a orientação em alguns trabalhos, como: [37, 38], ou ainda na literatura: [2].

Desta forma, para trabalhos futuros, utilizar outro tipo de representação da orientação pode fornecer a solução para o problema representação. Em

Referências

- 1 FLOYD, R. T. *Manual de cinesiologia estrutural*. Av. Ceci, 672 – Tamboré 06460-120 – Barueri – SP – Brasil: Manole Ltda, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 6, 16 e 17.
- 2 BARRIENTOS, A. et al. *Fundamentos de robótica*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2007. ISBN 9788448156367. Citado 4 vezes nas páginas 6, 16, 19 e 46.
- 3 DEFANTI, T.; SANDIN, D. J. *Sayre Glove Final Project Report*. 1977. Disponível em: <<https://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-limb-ultra>>. Acesso em: (accessed: 01.10.2021). Citado 3 vezes nas páginas 6, 22 e 23.
- 4 OTTOBOCK. *Michelangelo prosthetic hand*. 2021. Disponível em: <<https://www.ottobockus.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/solution-overview/michelangelo-prosthetic-hand>>. Acesso em: 24 de fev. de 2021. Citado na página 14.
- 5 ÖSSUR. *i-Limb*. 2021. Disponível em: <<https://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-limb-ultra>>. Acesso em: 24 de fev. de 2021. Citado na página 14.
- 6 OTTOBOCK. *bebionic*. 2020. Disponível em: <<https://www.ottobockus.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/solution-overview/bebionic-hand/>>. Acesso em: 24 de fev. de 2021. Citado na página 14.
- 7 Lee, D. et al. Kitech-hand: A highly dexterous and modularized robotic hand. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 22, n. 2, p. 876–887, 2017. Citado na página 14.
- 8 Jeong, S. H.; Kim, K.; Kim, S. Designing anthropomorphic robot hand with active dual-mode twisted string actuation mechanism and tiny tension sensors. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 2, n. 3, p. 1571–1578, 2017. Citado na página 14.
- 9 Pertuz, S. A. et al. A parallel system-on-chip approach for impedance controller for a 7- dof robotic hand. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, n. 106, p. 195–204, 2020. Citado na página 14.
- 10 Calderon, C. A. et al. Design and deployment of grasp control system applied to robotic hand prosthesis. *IEEE Latin America Transactions*, v. 15, n. 2, p. 181–188, 2017. Citado na página 14.
- 11 CHEOK, M. J.; OMAR, Z.; JAWARD, M. H. A review of hand gesture and sign language recognition techniques. 2016. Disponível em: <<https://doi-org.ez54.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s13042-017-0705-5>>. Citado 4 vezes nas páginas 14, 15, 22 e 23.
- 12 STURMAN, D.; ZELTZER, D. A survey of glove-based input. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v. 14, n. 1, p. 30–39, 1994. Citado na página 14.
- 13 O’FLYNN, B. et al. Novel smart sensor glove for arthritis rehabilitation. In: *2013 IEEE International Conference on Body Sensor Networks*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 23.

14 LIPPERT, L. S. *Cinesiologia clínica e anatomia*. Travessa do Ouvidor, 11 Rio de Janeiro – RJ – CEP 20040-040: Grupo Editorial Nacional - GEN, 2018. Citado na página 17.

15 SICILIANO, B.; KHATIB, O. *Springer Handbook of Robotics*. [S.l.]: Springer, 2016. ISBN 978-3-540-23957-4. Citado na página 19.

16 DEVICES, A. *ADXL345 Application Note AN-1057*. P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A., 2010. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/products/adxl345.html>>. Citado na página 20.

17 VATHSANGAM, H. *My imu estimation experience*. 2010. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/myimuestimationexperience/filters/complementary-filter>>. Acesso em: 20 de junho de 2021. Citado na página 20.

18 TEDALDI, D.; PRETTO, A.; MENEGATTI, E. A robust and easy to implement method for imu calibration without external equipments. In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 3042–3049. Citado na página 21.

19 NXP SEMICONDUCTORS. *UM10204 - I2C-bus specification and user manual*. [S.l.], 2014. Citado na página 22.

20 WISE, S. et al. Evaluation of a fiber optic glove for semi-automated goniometric measurements. v. 27, n. 4, p. 411–424, Outono 1990. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2089151/>>. Citado na página 22.

21 STURMAN, D. J.; ZELTZER, D. A survey of glove-based input. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v. 14, p. 30–39, 1994. Citado na página 22.

22 DIPIETRO, L.; SABATINI, A. M.; DARIO, P. A survey of glove-based systems and their applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, v. 38, n. 4, p. 461–482, 2008. Citado na página 22.

23 KANTAREDDY, S. N. R. et al. Learning gestures using a passive data-glove with rfid tags. p. 327–332, 2019. Citado na página 23.

24 "OPEN SOURCE UNO SOMATOSENSORY WEARABLE ROBOT GLOVES". 2021. Disponível em: <"<https://alexnld.com/product/open-source-arduino-uno-somatosensory-wearable-robot-gloves/?gclid=Cj0KCQjwvr6EBhDOARIsAPpqUPG3p5aJZkkf-KqNC3bvOyQAiwrSTyPCInfCZGoYBw748gaVSxhpEMwcB>">. Citado na página 23.

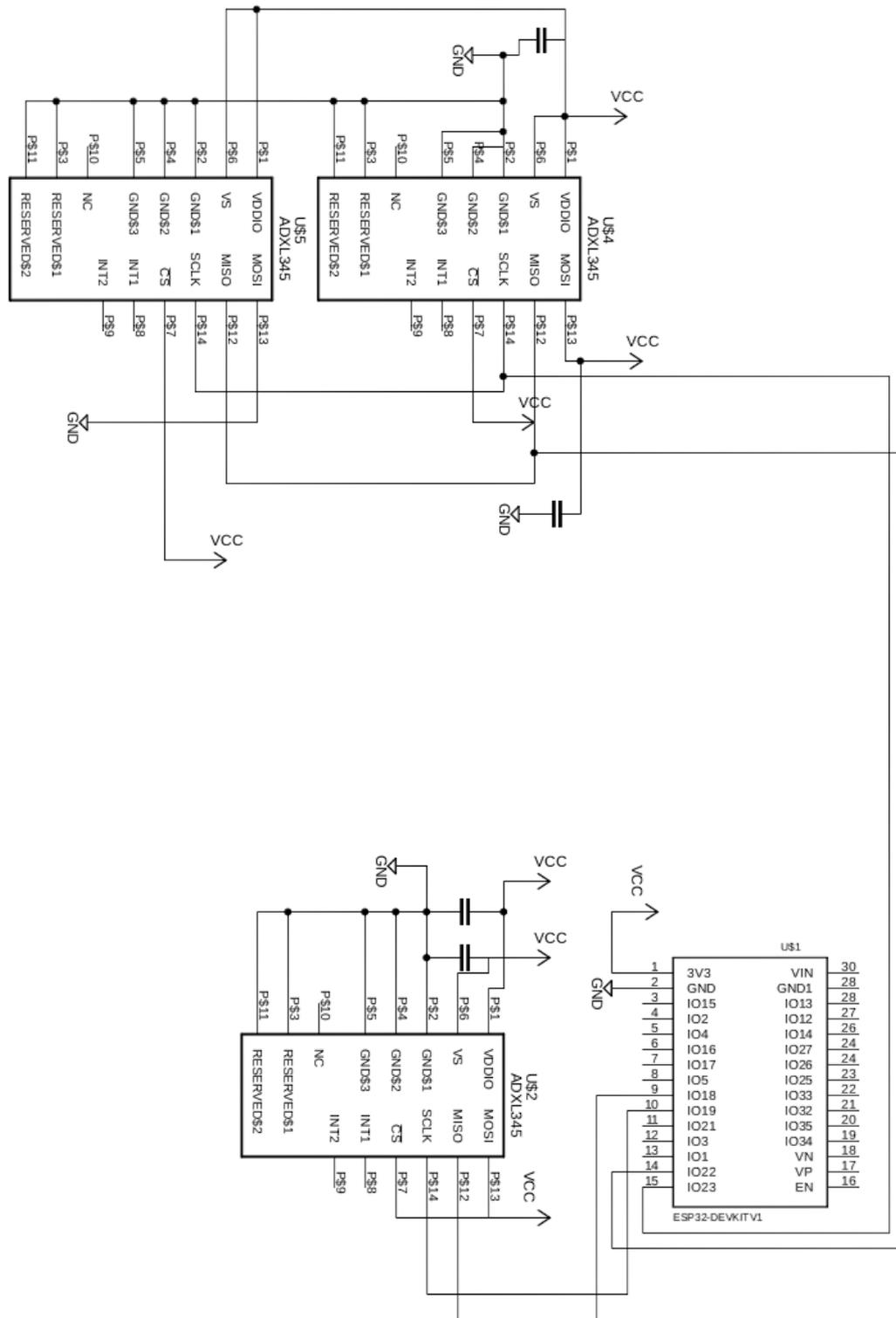
25 5DT TECHNOLOGIES. *5dt-data-glove-ultra*. 2021. Disponível em: <<https://5dt.com/5dt-data-glove-ultra/>>. Acesso em: 30 de Outubro de 2021. Citado na página 24.

26 VIRTUAL MOTION LABS. *VMG 8*. 2021. Disponível em: <<https://www.vrealities.com/products/data-gloves/dg5>>. Acesso em: 30 de Outubro de 2021. Citado na página 24.

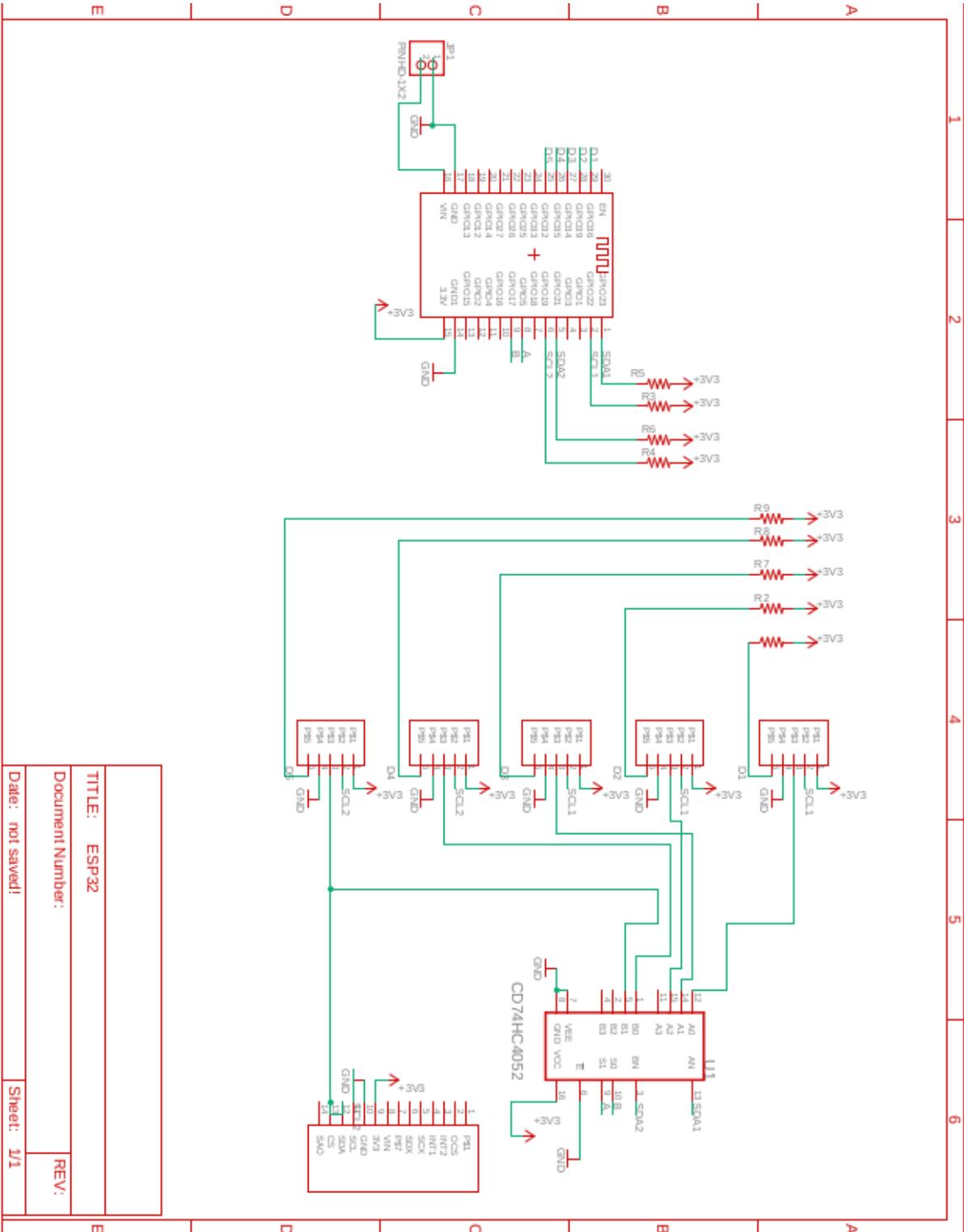
27 CYBERGLOVE SYSTEMS INC. *cyberglove-ii*. 2021. Disponível em: <<http://www.cyberglovesystems.com/cyberglove-ii>>. Acesso em: 30 de Outubro de 2021. Citado na página 24.

- 28 KNOXLABS. *Xsens Gloves – Knoxlabs*. 2021. Disponível em: <<https://www.knoxlabs.com/products/xsens-gloves>>. Acesso em: 30 de Outubro de 2021. Citado na página 24.
- 29 CAPTOGLOVE. *oGlove® Virtual Reality amp; smart glove VR AR PC mobile gaming - Buy*. 2021. Disponível em: <<https://www.captoglove.com/product-category/consumers>>. Acesso em: 30 de Outubro de 2021. Citado na página 24.
- 30 ROKOKO. *Produtos, Smartgloves*. 2021. Disponível em: <<https://www.rokoko.com/products/smartgloves>>. Acesso em: 30 de Outubro de 2021. Citado na página 24.
- 31 PERCEPTION NEURON. *perception-neuron-studio-system*. 2021. Disponível em: <<https://neuronmocap.com/perception-neuron-studio-system>>. Acesso em: 30 de Outubro de 2021. Citado na página 24.
- 32 INVENSENSE. *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4t*. 1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A., 2013. Disponível em: <<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 35.
- 33 SYSTEMS, E. *ESP32 Series Datasheet*. Rio de Janeiro, Brasil, 2020. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/support/download/documents>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 30.
- 34 ESPRESSIF SYSTEMS (SHANGHAI) CO., LTD. *ESP-IDF Programming Guide*. 2021. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/index.html>>. Acesso em: 30 de setembro de 2021. Citado na página 27.
- 35 FREITAS, F. S. *Repositório: Sensor-Luva*. 2020. Disponível em: <<https://github.com/filipesfreitas/sensor-luva/tree/esp32/udp>>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 45.
- 36 DIEBEL, J. Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors. *Matrix*, v. 58, p. 35, 01 2006. Citado na página 46.
- 37 KIM, A.; GOLNARAGHI, M. A quaternion-based orientation estimation algorithm using an inertial measurement unit. In: *PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No.04CH37556)*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 268–272. Citado na página 46.
- 38 WEN, K. et al. A new quaternion kalman filter based foot-mounted imu and ubw tightly-coupled method for indoor pedestrian navigation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 69, n. 4, p. 4340–4352, 2020. Citado na página 46.

APÊNDICE B – Esquemático utilizado para testar o modelo cinemático direto.



APÊNDICE C – Esquemático circuito da luva



TITLE:	ESP32
Document Number:	
REV:	
Date:	not saved!
Sheet:	1/1