

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR)  
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

JOÃO CARLOS CARDOSO DOS SANTOS  
CAIQUE DESTRO

**UMA LUVA CAPTURADORA DE MOVIMENTOS USANDO  
SENSORES ÓTICOS DE FLEXÃO E REPLICAÇÃO DOS  
MOVIMENTOS CAPTURADOS UTILIZANDO MÃO ROBÓTICA.**

OFICINA DE INTEGRAÇÃO 2 – RELATÓRIO FINAL

CURITIBA

2019

**JOÃO CARLOS CARDOSO DOS SANTOS  
CAIQUE DESTRO**

**UMA LUVA CAPTURADORA DE MOVIMENTOS USANDO  
SENSORES ÓTICOS DE FLEXÃO E REPLICAÇÃO DOS  
MOVIMENTOS CAPTURADOS UTILIZANDO MÃO ROBÓTICA.**

Relatório Final da disciplina Oficina de Integração 2, do curso de Engenharia de Computação, apresentado aos professores que ministram a mesma na Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção da aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. César Manuel Vargas  
Benítez  
Prof. Dr. Heitor S. Lopes

**CURITIBA**

**2019**

## **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento deste projeto não seria possível sem o apoio de algumas pessoas que em sua infinita paciência nos ofereceram ajuda, componentes e conselhos e colaboraram para o projeto caber em nossos orçamentos financeiro e psicológico

Everson de Souza por emprestar a placa Arduino Mega 2560

Clara Luisa Pohl (Namorada do Caique) pelo auxílio para costurar os sensores de flexão na versão final da luva

Guilherme Coelho por nos ceder o Raspberry Pi Zero W

Pet-CoCE e Gustavo Guedes que nos ajudaram a imprimir a mão robótica

Aos professores pela orientação, incentivo e a paciência que nos permitiu ir até o final e conseguir um resultado satisfatório no projeto

## RESUMO

. UMA LUVAS CAPTURADORA DE MOVIMENTOS USANDO SENSORES ÓTICOS DE FLEXÃO E REPLICAÇÃO DOS MOVIMENTOS CAPTURADOS UTILIZANDO MÃO ROBÓTICA.. 40 f. Oficina de Integração 2 – Relatório Final – Curso de Engenharia de Computação, UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR). Curitiba, 2019.

O presente documento relata o desenvolvimento de uma luva capaz de capturar movimentos da mão do usuário, utilizando Arduino Mega 2560 com capacidade de transmissão de dados via bluetooth ou USB, e uma mão robótica capaz de replicar os movimentos capturados, com utilização de um Raspberry Pi Zero W.

**Palavras-chave:** Arduino Mega, Raspberry Pi, Captura de movimento, Replicação de movimentos

## **ABSTRACT**

. A MOTION CAPTURE GLOVE USING OPTICAL FLEXION SENSORS AND REPLICATION OF CAPTURED MOVEMENTS USING ROBOTIC HAND.. 40 f. Oficina de Integração 2 – Relatório Final – Curso de Engenharia de Computação, UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR). Curitiba, 2019.

This paper reports the development of a glove capable of capturing a user's hand movements using Arduino Mega 2560 capable of transmitting data via bluetooth or USB, and a robotic hand capable of replicating captured movements using a Raspberry Pi. Zero W.

**Keywords:** Arduino Mega, Raspberry Pi, Motion Capture, Replication of movements

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Articulações da mão humana. Fonte: Wikipedia	15
FIGURA 2	– Pinagem da placa Raspberry Pi Zero W. Fonte: raspberrypi.stackexchange.com	16
FIGURA 3	– Placa PCA9685. Fonte: hobbycomponents.com	17
FIGURA 4	– Placa Arduino Mega2560. Fonte: alselectro.com	17
FIGURA 5	– Pinagem do microcontrolador ATmega2560. Fonte: Site oficial Arduino	18
FIGURA 6	– Pinagem do adaptador Bluetooth HC-06. Fonte: Components101.com	19
FIGURA 7	– Sensor óptico de flexão. Fonte: Autoria própria	19
FIGURA 8	– Curva da relação entre resistência e luminosidade no LDR. Fonte: Datasheet LDR	20
FIGURA 9	– Placa MPU6050, sensor inercial. Fonte: filipeflop.com	21
FIGURA 10	– Exemplos de ondas PWM e diferentes <i>duty cycles</i> . Fonte: Wikipedia	21
FIGURA 11	– Representação da comunicação serial em contraste com a comunicação paralela. Fonte: Wikipedia	22
FIGURA 12	– Representação visual do funcionamento de um UART. Fonte: Wikipedia	23
FIGURA 13	– Diagrama de blocos do sistema. Fonte: autoria própria	24
FIGURA 14	– Luva parcialmente construída. Fonte: autoria própria	25
FIGURA 15	– Versão final da luva. Fonte: autoria própria	26
FIGURA 16	– Esquemático dos sensores e divisores de tensão. Fonte: autoria própria	27
FIGURA 17	– Diagrama Luva e Arduino Mega 2560. Fonte: autoria própria	27
FIGURA 18	– Mão robótica parcialmente construída. Fonte: autoria própria	28
FIGURA 19	– Dedo da mão robótica construído com as linhas. Fonte: autoria própria	29
FIGURA 20	– Mão robótica finalizada. Fonte: autoria própria	29
FIGURA 21	– Diagrama de blocos do hardware da mão robótica. Fonte: autoria própria	30
FIGURA 22	– Fluxograma do software presente no Arduino Mega 2560. Fonte: autoria própria	31
FIGURA 23	– Fluxograma do software presente no Raspberry Pi Zero W. Fonte: autoria própria	32
FIGURA 24	– Mão virtual no software 3D Autodesk Maya. Fonte: autoria própria	32
FIGURA 25	– Cronograma final	35

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1	– Cronograma proposto .....	36
TABELA 2	– Cronograma Final .....	37
TABELA 3	– Tabela de custos .....	38

## LISTA DE SIGLAS

SoB	System on a Board
SoC	System On a Chip
CPU	Central Processing Unit
USB	Universal Serial Bus
OTG	On-The-Go
GPIO	General Purpose In and Out
I2C	Inter-Integrated Circuit
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
PWM	Pulse-Width Modulation
GND	Ground
LDR	Light Dependent Resistor
IMU	Inertial Measurement Unit
FIFO	First-In First-Out
RGB	Red Green Blue
USB	Universal Serial Bus

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
2.1	CONCEITO	15
2.2	COMPONENTES	16
2.2.1	Raspberry Pi Zero W	16
2.2.1.1	PCA9685	17
2.2.2	Arduino Mega 2560	17
2.2.2.1	HC-06	19
2.3	SENSORES	19
2.3.1	Sensores ópticos de flexão	19
2.3.2	Sensor inercial	20
2.4	ATUADORES	20
2.4.1	Servomotores	20
2.5	SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE	21
2.5.1	Pulse Width Modulation	21
2.5.2	Comunicação serial	22
2.5.2.1	UART	22
2.5.2.2	I2C	22
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>24</b>
3.1	VISÃO GERAL	24
3.2	A LUVA	24
3.2.1	Projeto Mecânico da luva	24
3.2.2	Projeto de Hardware da luva	25
3.3	A MÃO ROBÓTICA	28
3.3.1	Projeto mecânico da mão robótica	28
3.3.2	Projeto de hardware da mão robótica	30
3.4	PROJETO DE SOFTWARE E INTEGRAÇÃO DOS COMPONENTES	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>CRONOGRAMA E CUSTOS DO PROJETO</b>	<b>35</b>
5.1	CRONOGRAMA PROPOSTO	35
5.1.1	Cronograma executado	35
5.2	CUSTOS	35
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>39</b>
6.1	CONCLUSÕES	39
6.2	TRABALHOS FUTUROS	39
	REFERÊNCIAS	40

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Soluções de captura de movimentos tradicionais presentes na atualidade consistem em sistemas de alto custo que utilizam grandes espaços requerendo configurações com múltiplas câmeras e trajes especializados. Mais especificamente, dispositivos capazes de capturar movimentos de mãos são oferecidos apenas para mercados e pessoas bem específicas, utilizando sensores e soluções de software proprietários extremamente caros. Alternativamente, novos softwares de reconhecimento de imagens estão sendo desenvolvidos para captura de movimentos porém ainda estão em suas fases iniciais e ainda não apresentam confiabilidade ou resultados satisfatórios.

Captura de movimentos de mãos é algo de importante relevância na sociedade, porém soluções de baixo custo são extremamente escassas. Alguns exemplos de aplicações de tal tecnologia são: jogos e simuladores de realidade virtual na indústria de entretenimento, terapia e estudos dos movimentos das mãos de pacientes na indústria médica, entre outras. Isso aliado a uma tecnologia de replicação dos movimentos por uma mão robótica pode permitir a quebra de barreiras físicas e de distância, permitindo não só a realização de procedimentos a distância, mas minimizando riscos de contaminação em procedimentos médicos ou de ferimentos em ambientes de alto risco.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

O presente projeto se propõe a criar um sistema de captura de movimentos e replicação dos movimentos por uma mão robótica, utilizando componentes e materiais de baixo custo.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos do projeto são:

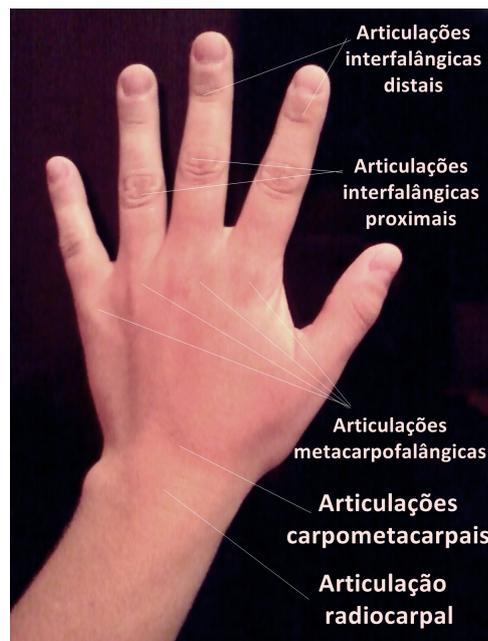
- Criação e construção de uma luva capturadora de movimentos das articulações dos dedos e orientação da mão do usuário;
- Monitoramento e visualização dos dados obtidos em um computador externo utilizando software 3D;
- Construção de uma mão robótica capaz de replicar os movimentos capturados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CONCEITO

O conceito do projeto consiste na utilização de múltiplos sensores, atuadores e dispositivos que possam se comunicar com o objetivo de se utilizar uma luva que possa registrar os movimentos da mão utilizando sensores de flexão dos dedos, assim como rotação da mão como um todo, e utilizar os dados obtidos para controle de uma mão robótica ou visualização externa.

A mão humana pode possuir 3 articulações principais para flexão dos dedos para flexão dos dedos. São elas: articulações interfalângicas distais, articulações interfalângicas proximais e articulações metacarpofalângicas (figura 1). As articulações interfalângicas são capazes apenas de movimentos de rotação de até 90 graus em apenas um eixo enquanto a última é capaz de realizar rotações de 90 graus em um eixo e 30 graus em um eixo adicional.



**Figura 1: Artificações da mão humana. Fonte: Wikipedia**

Utilizando-se sensores de flexão é possível capturar a quantidade de flexão em cada

uma dessas articulações. Com esses dados é possível a visualização dos movimentos em um software 3D em um computador ou a replicação dos movimentos por outros dispositivos, como por exemplo uma mão robótica.

Para comunicação entre os componentes são utilizado variados protocolos de comunicação. Para construção da mão foi envisioned um modelo semelhante ao de tendões presentes na mão humana. Nesse modelo linhas se comportam como tendões sendo puxadas por atuadores responsáveis por flexionar ou extender os dedos.

## 2.2 COMPONENTES

### 2.2.1 RASPBERRY PI ZERO W

O Raspberry Pi Zero W é uma versão reduzida e de baixo custo da popular série de SoBs Raspberry Pi. O sistema conta com um SoC com uma CPU single-core de frequência de 1GHz, 512 MGMegabytes de RAM e recursos úteis para o projeto como USB OTG, Bluetooth e Wifi integrados, portas GPIO e comunicações serial I2C e UART possível via Bluetooth ou GPIO(RASPBERRY PI, 2019). A placa é alimentada por uma fonte Micro USB de 5V.

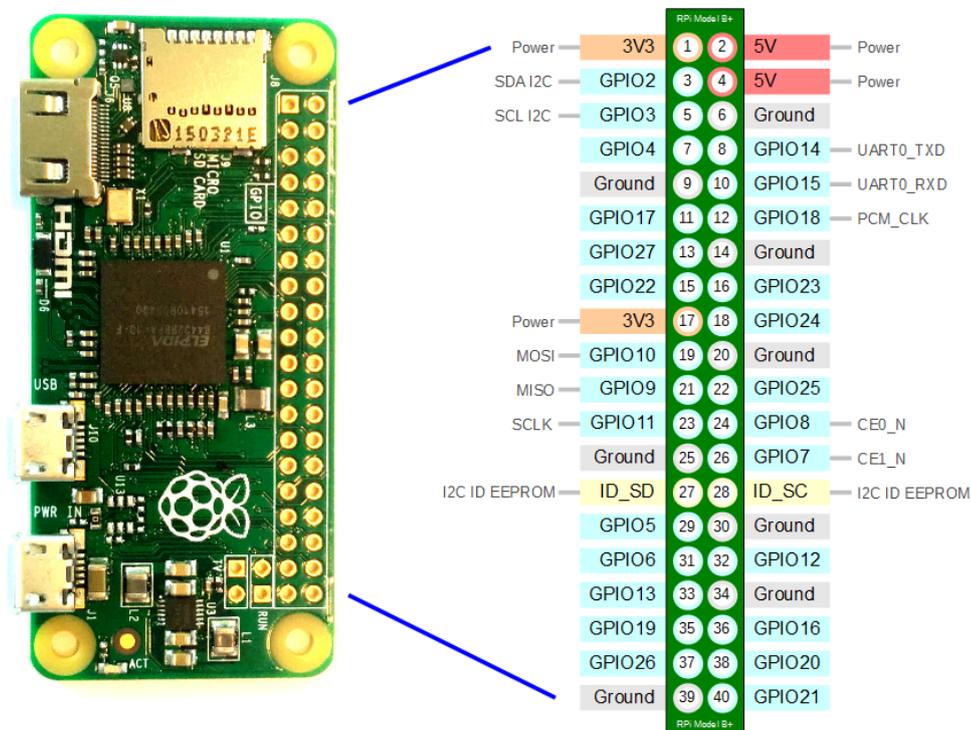
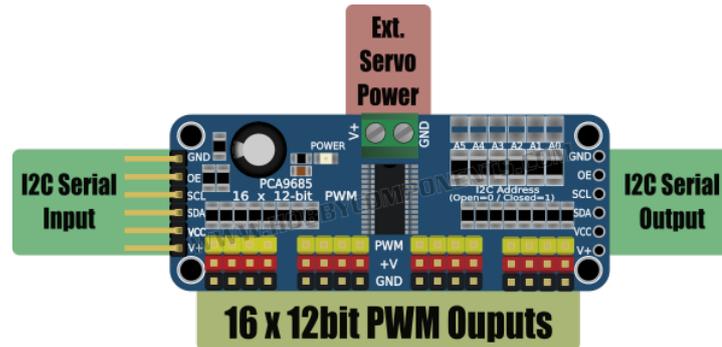


Figura 2: Pinagem da placa Raspberry Pi Zero W. Fonte: [raspberrypi.stackexchange.com](http://raspberrypi.stackexchange.com)

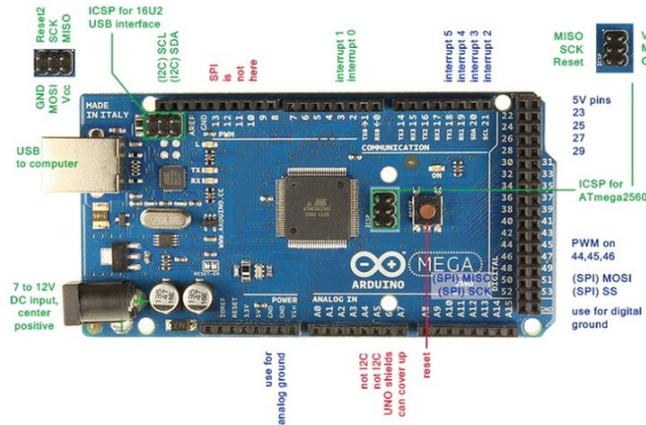
### 2.2.1.1 PCA9685

Para controle dos atuadores é utilizada a placa PCA9685 em conjunto com o Raspberry Pi Zero W. Um controlador que permite enviar sinais PWM com um *duty cycle* ajustável de 0% a 100% para controle dos atuadores. Opera com uma tensão de 2.3V a 5.5V. A placa é controlada via protocolo serial I2C(NXP, 2015).



**Figura 3: Placa PCA9685. Fonte: hobbycomponents.com**

### 2.2.2 ARDUINO MEGA 2560



**Figura 4: Placa Arduino Mega2560. Fonte: alselectro.com**

O Arduino Mega 2560 (figura 4) é uma placa microcontroladora baseada no chip ATmega2560. Em contraste com outras placas Arduino, ela é designada para projetos que requerem mais portas de entrada e saída ou memória. Possui 54 pinos de entrada e saída digitais, 16 entradas analógicas e 3 portas seriais UART, saídas PWM e comunicação serial via USB. A placa pode ser alimentada por uma fonte normal ou USB de 5V ou através dos pinos de 5V e GND presentes na placa (ARDUINO, 2019). A pinagem do microcontrolador ATmega2560 pode ser observada na figura 5.

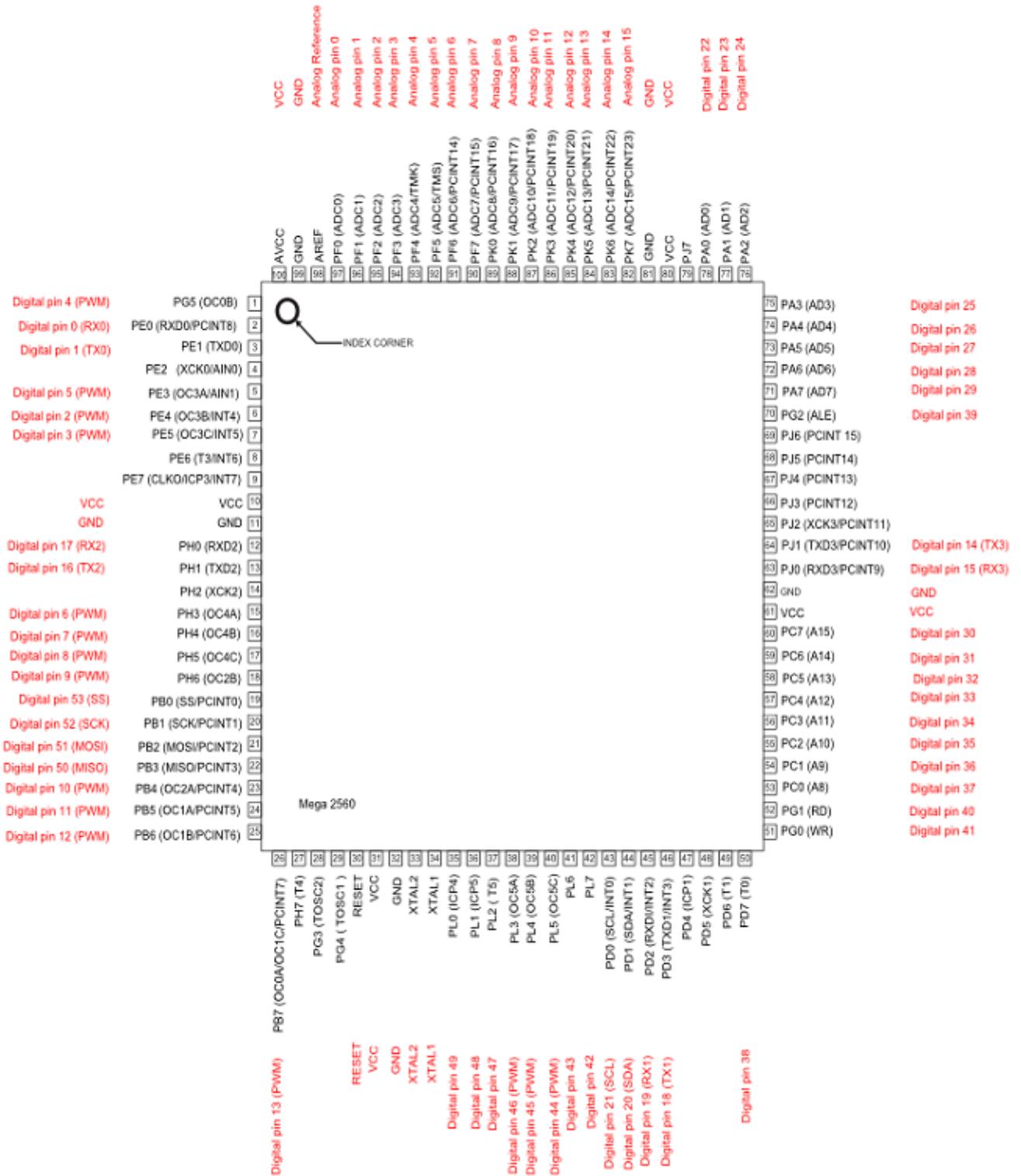
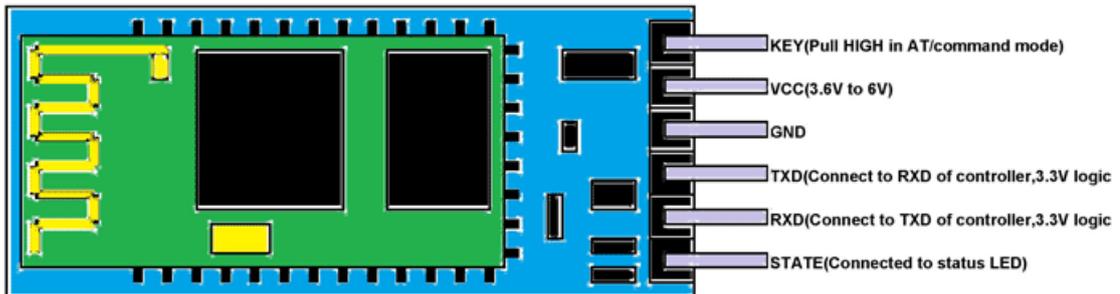


Figura 5: Pinagem do microcontrolador ATmega2560. Fonte: Site oficial Arduino

### 2.2.2.1 HC-06

Em conjunto com a placa Arduino Mega 2560 foi utilizado um adaptador Bluetooth HC-06 alimentado por tensão 5V. Utiliza protocolo serial UART para comunicação. (GUANGZHOU HC INFORMATION TECHNOLOGY CO., LTD., 2011)

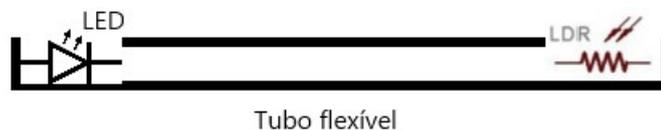


**Figura 6: Pinagem do adaptador Bluetooth HC-06. Fonte: Components101.com**

## 2.3 SENSORES

### 2.3.1 SENSORES ÓPTICOS DE FLEXÃO

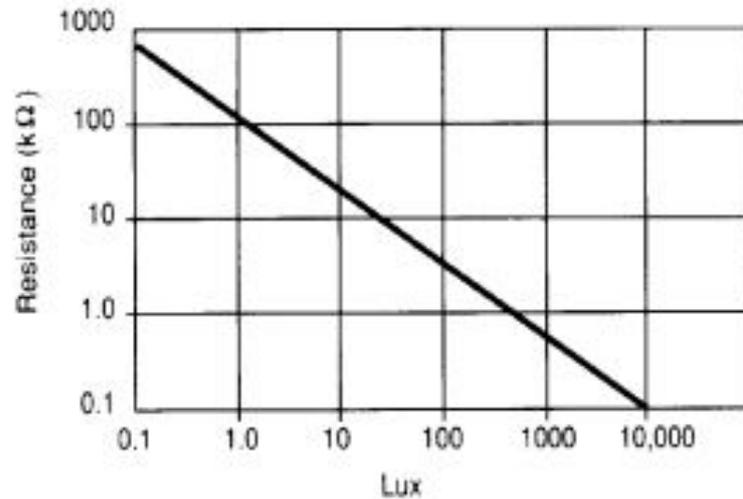
Consiste em um tubo preto com um emissor de luz em uma extremidade e um sensor de luz em outra, ao ocorrer a dobra do tubo, menos luz do emissor alcança o sensor, o que causa um sinal que pode ser interpretado pelo microcontrolador (ZIMMERMAN, 1985). Um diagrama simplificado do sensor pode ser visto da figura. 7.



**Figura 7: Sensor óptico de flexão. Fonte: Autoria própria**

Como emissores de luz foram utilizados LEDs de alto ou baixo brilho dependendo do comprimento do tubo. Como sensor foram utilizados resistores dependentes de luz (LDR), que são resistores que consistem em duas células fotocondutoras de sulfeto de cádmio (cds) com respostas espectrais semelhante ao do olho humano (SUNROOM TECHNOLOGIES, 2013). A resistência celular diminui com o aumento da intensidade da luz emitida sobre o resistor. A

relação entre a resistência e luminosidade pode ser vista na figura 8. Com essa variação de resistência é possível a montagem de um circuito de divisão de tensão capaz de enviar sinais elétricos para um microcontrolador.



**Figura 8: Curva da relação entre resistência e luminosidade no LDR. Fonte: Datasheet LDR**

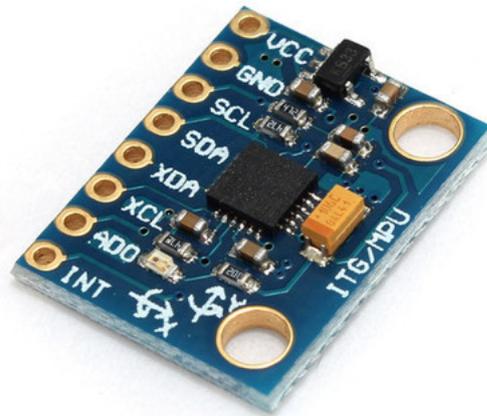
### 2.3.2 SENSOR INERCIAL

O sensor inercial (IMU) foi utilizado para medidas de rotação. É um sensor que combina um giroscópio de 3 eixos e um acelerômetro de 3 eixos e um processador digital de movimentos em um só pacote. Possui um conversor analógico digital integrado para conversão das leituras em e um buffer FIFO para menor consumo de energia. Utiliza comunicação I2C e alimentação entre 2.38V e 3.47V.(INVENSENSE, INC., 2013)

## 2.4 ATUADORES

### 2.4.1 SERVOMOTORES

Servomotor é um tipo de motor muito utilizado em automação para aplicações que exigem alta precisão no controle, torques altos, pouco ruído e boa manutenção. O servomotor em questão funciona de maneira que a posição do eixo é definida de acordo com o sinal PWM recebido pelo servo, para cada valor de *duty cycle* o motor assume uma única posição. Os servomotores utilizados são do modelo SG90. Um modelo compacto e leve com alto torque e rotação de aproximadamente 180 graus (90 graus para cada direção). Possui um torque de 1.8 kgf.cm, velocidade de 0.1s/60 graus e opera a uma tensão de aproximadamente 5V (??). O motor é controlado através de sinais PWM

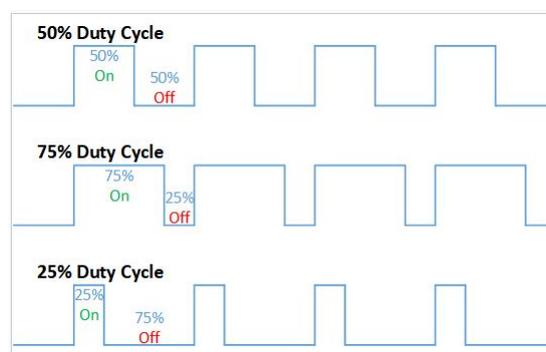


**Figura 9: Placa MPU6050, sensor inercial. Fonte: filipeflop.com**

## 2.5 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E CONTROLE

### 2.5.1 PULSE WIDTH MODULATION

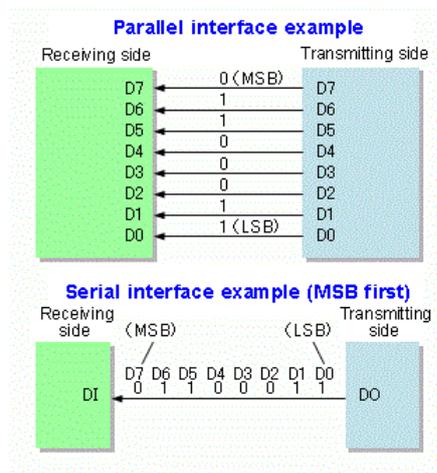
Sinais PWM consistem em sinais digitais com exemplos de aplicações sendo controle de motores e LEDs RGB. Uma onda retangular é cortada em vários pulsos digitais permitindo a variação(ou modulação) do valor médio de energia gerado pelo sinal. O *duty cycle* é o que determina o período de tempo em que o sinal está ligado e é expressado em porcentagem, com 100% sendo sempre ligado. Exemplos de *duty cycles* e suas respectivas formas de onda resultantes podem ser vistos na figura 12



**Figura 10: Exemplos de ondas PWM e diferentes *duty cycles*. Fonte: Wikipedia**

## 2.5.2 COMUNICAÇÃO SERIAL

Comunicação serial é o processo de mandar dados um bit por vez de forma sequencial e padronizada, diferente da comunicação paralela, onde a comunicação é feita com vários canais em paralelo enviando sinais simultaneamente, uma comunicação serial precisa de apenas um canal de comunicação. No entanto, para que não haja conflito, normalmente para comunicação em duas vias são usados dois, um para receber dados e um para transmitir dados. Neste projeto, foram usadas comunicações seriais entre o Raspberry e o computador, entre o Arduino e o computador, entre o arduino e o dispositivo bluetooth (HC-06), entre o raspberry e o driver dos motores e entre o raspberry e o sensor inercial (MPU6050).



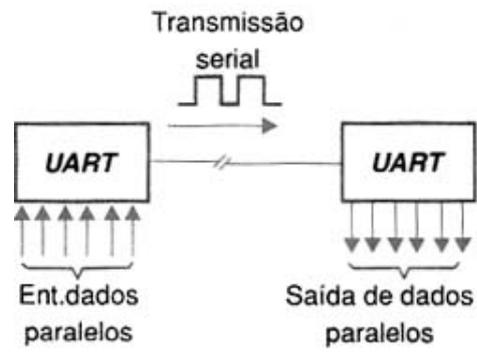
**Figura 11: Representação da comunicação serial em contraste com a comunicação paralela. Fonte: Wikipedia**

### 2.5.2.1 UART

UART é o dispositivo que faz a conversão entre comunicação serial e comunicação paralela, e está presente no HC-06 deste projeto. O protocolo bluetooth utiliza diversas diferentes frequências e sinais para fazer a comunicação, desta forma, precisa fazer a separação das diferentes informações através do dispositivo UART. A comunicação é feita através das portas TX e RX.

### 2.5.2.2 I2C

I2C é um protocolo para interfaces de dois fios utilizado para conectar dispositivos de baixa velocidade. Utiliza as portas SDA(serial data) e SCL(serial clock) e transferências de 8 bits. Utiliza hierarquia mestre e escravo onde cada dispositivo possui um endereço de 7 bits. A



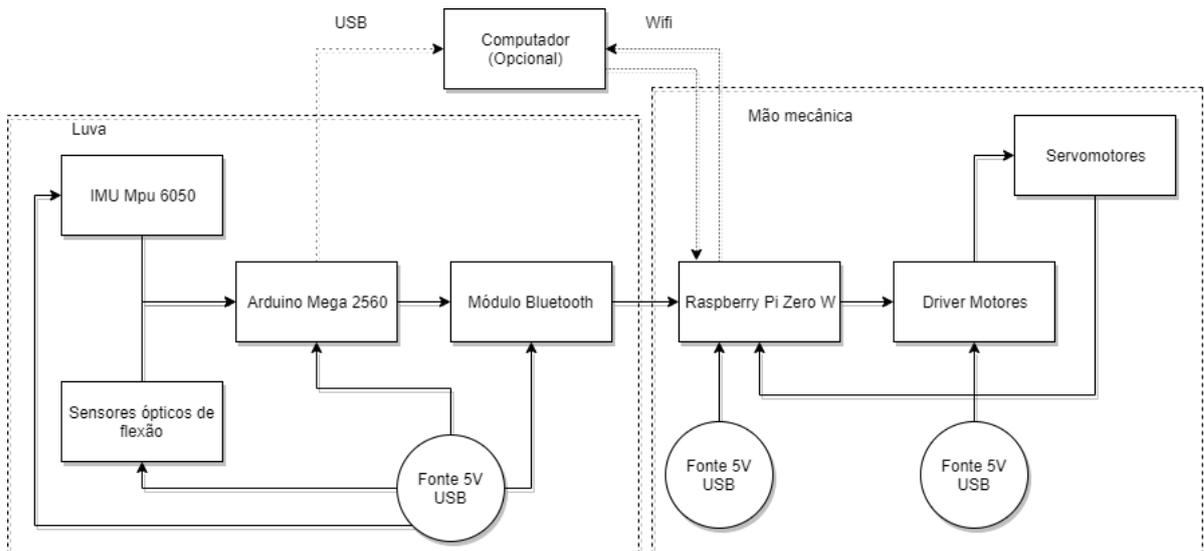
**Figura 12: Representação visual do funcionamento de um UART. Fonte: Wikipedia**

comunicação é iniciada pelo dispositivo mestre com uma condição de início o que define se o mestre ou escravo irá escrever ou ler no barramento.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 VISÃO GERAL

O projeto é separado em dois componentes principais, uma luva capturadora de movimentos e uma mão robótica. Ambos os dispositivos são capazes de funcionar de maneira independente, com a luva sendo capaz de enviar os dados para um computador e a mão robótica sendo capaz de receber dados de um computador. Da mesma forma, os dois dispositivos podem trabalhar em conjunto com a mão robótica replicando os movimentos capturados pela luva.



**Figura 13: Diagrama de blocos do sistema. Fonte: autoria própria**

#### 3.2 A LUVA

##### 3.2.1 PROJETO MECÂNICO DA LUVA

Foram construídos os sensores de fibra óptica para cada articulação e posicionados nas articulações interfalângicas proximais utilizando LEDs de baixo brilho e nas articulações metacarpofalângicas utilizando LEDs de alto brilho. As articulações correspondentes podem ser observadas na figura 1.

Os sensores ópticos de flexão foram costurados a uma luva de couro sintético, uma de suas extremidades ficou fixa na luva enquanto a outra foi deixada solta e foi introduzida em um tubo (também costurado na luva de maneira fixa) para permitir a livre flexão das articulações do usuário. A figura 14 apresenta a luva parcialmente construída.



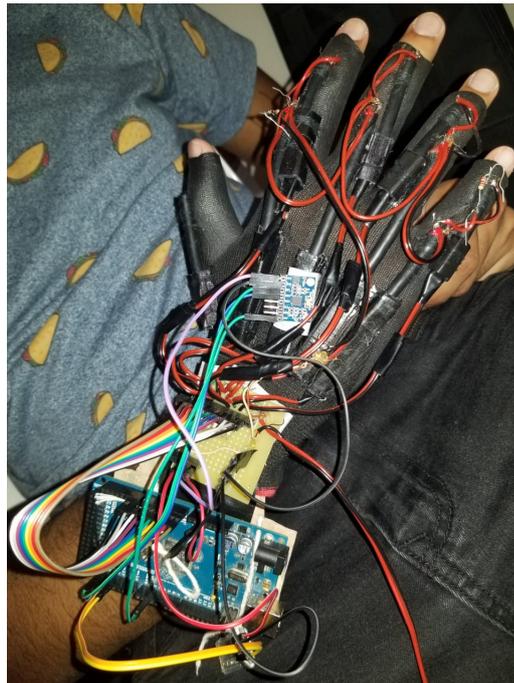
**Figura 14: Luva parcialmente construída. Fonte: autoria própria**

Na parte posterior da luva também se encontra o sensor inercial MPU6050 utilizado para registrar a orientação da luva. No pulso está fixado o Arduino Mega 2560 com o adaptador Bluetooth HC-06. O resultado final pode ser visto na figura 15.

### 3.2.2 PROJETO DE HARDWARE DA LUVA

Integrados a luva estão a placa de saída de dados e alimentação da luva assim como um Arduino Mega 2560. A luva é alimentada por uma fonte USB de 5V.

Cada LDR foi testado de forma individual para aferir o comportamento do valor da resistência ao flexionar cada articulação dos dedos. Isso foi feito de forma a definir os valores de cada resistor utilizado na saída dos sensores ópticos de flexão já que foi necessário a montagem de circuitos divisores de tensão para cada sensor. Os LDR e os resistores definidos foram então soldados em uma placa de cobre onde também estão presente o cabo USB responsável pela alimentação da luva assim como conectores para jumpers fêmea responsáveis pela saída do sinal dos sensores assim como alimentação dos demais componentes do sistema.



**Figura 15: Versão final da luva. Fonte: autoria própria**

A placa Arduino é utilizada como um receptor dos dados analógicos dos sensores e um conversor analógico digital, assim como receptor dos dados do sensor inercial. Por possuir inúmeras entradas e saídas digitais e analógicas assim como várias portas seriais diferentes essa placa nos deu grande flexibilidade para escolher a maneira de comunicação entre os componentes do projeto. Dessa forma foi desenvolvida a comunicação serial entre os demais componentes com opção para bluetooth utilizando o adaptador HC-06 ou via USB.

A placa de saída de dados consiste em uma placa de cobre onde estão soldados os resistores e as saídas dos valores de tensão dos LDR. Desse jeito foi feita a divisão de tensão responsável pela saída dos dados dos sensores ópticos de flexão que podem ser conectados ao Arduino. O esquemático da luva com os sensores ópticos de flexão e divisores de tensão podem ser vistos na figura 16

Cada saída dos divisores de tensão foi ligado a uma porta analógica do Arduino e as saídas do sensor inercial foram ligados às suas respectivas portas I2C. O diagrama final do hardware entre luva e Arduino pode ser visto na figura 17.

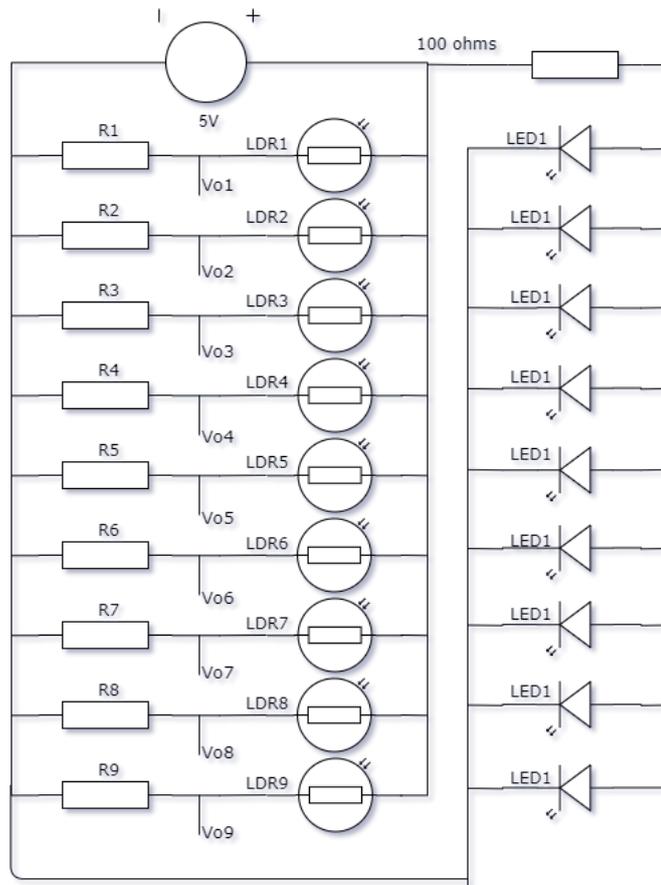


Figura 16: Esquemático dos sensores e divisores de tensão. Fonte: autoria própria

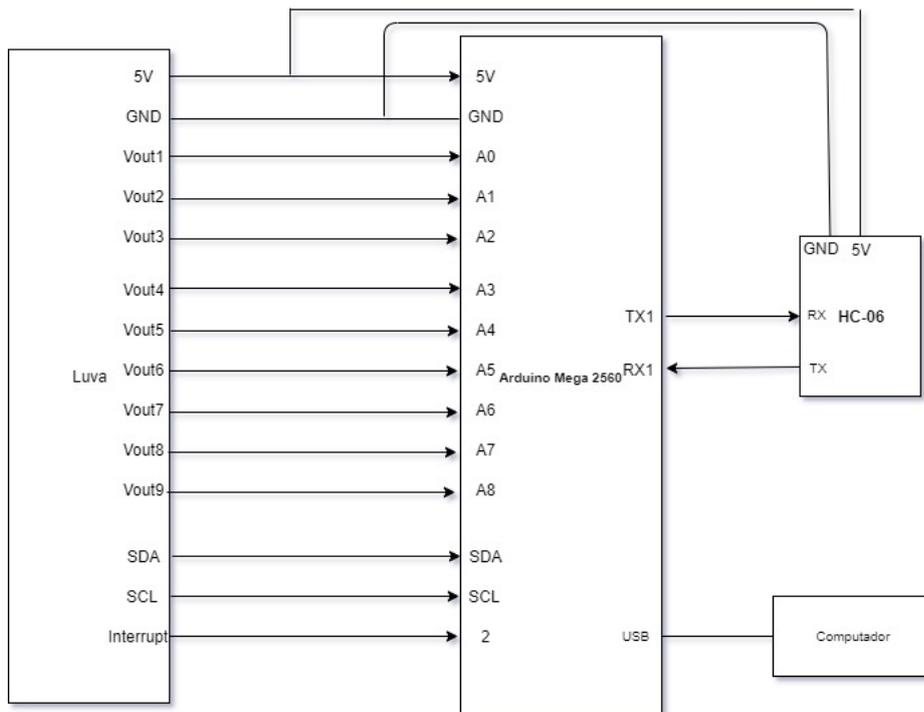
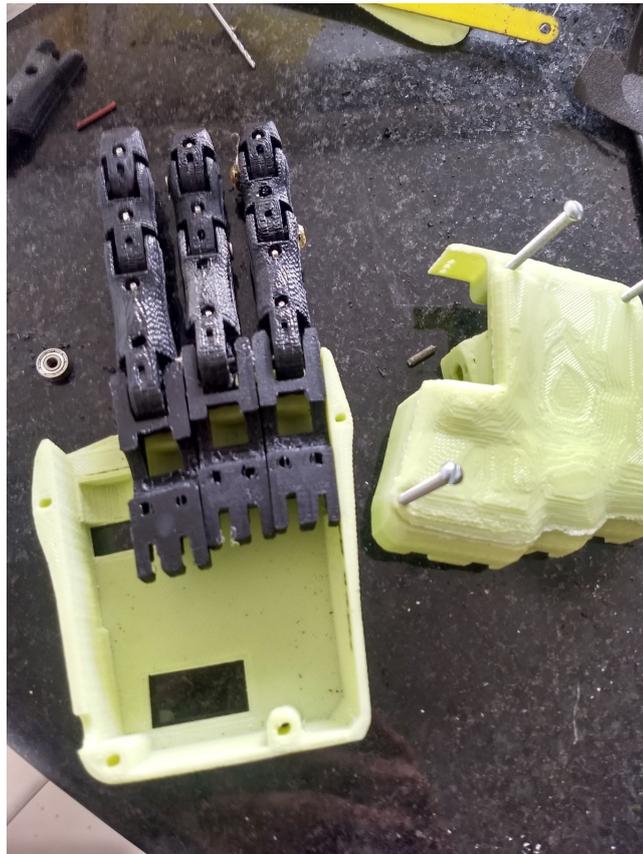


Figura 17: Diagrama Luva e Arduino Mega 2560. Fonte: autoria própria

### 3.3 A MÃO ROBÓTICA

#### 3.3.1 PROJETO MECÂNICO DA MÃO ROBÓTICA

A mão robótica foi obtida de um projeto de fonte aberta encontrado na internet (OPEN HAND PROJECT, 2013), e foi construída com utilização de uma impressora 3D. Como material foi utilizado plástico ABS. Nas juntas de cada articulação foram utilizados rolamentos miniatura e as peças foram fixadas com parafusos.



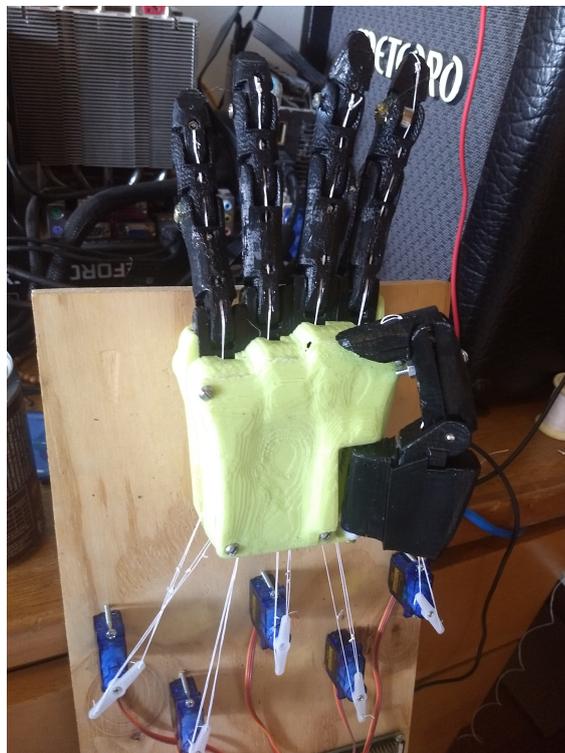
**Figura 18: Mão robótica parcialmente construída. Fonte: autoria própria**

Para movimentos dos dedos foram fixadas linhas nas extremidades de cada face do dedo e presas a seus respectivos servo motores. A mão robótica é capaz apenas de dobrar todas as articulações de cada dedo de forma dependente.

A mão robótica, os componentes e os servomotores foram então fixados em uma placa de madeira. O resultado final pode ser observado na figura 20



**Figura 19: Dedo da mão robótica construído com as linhas. Fonte: autoria própria**



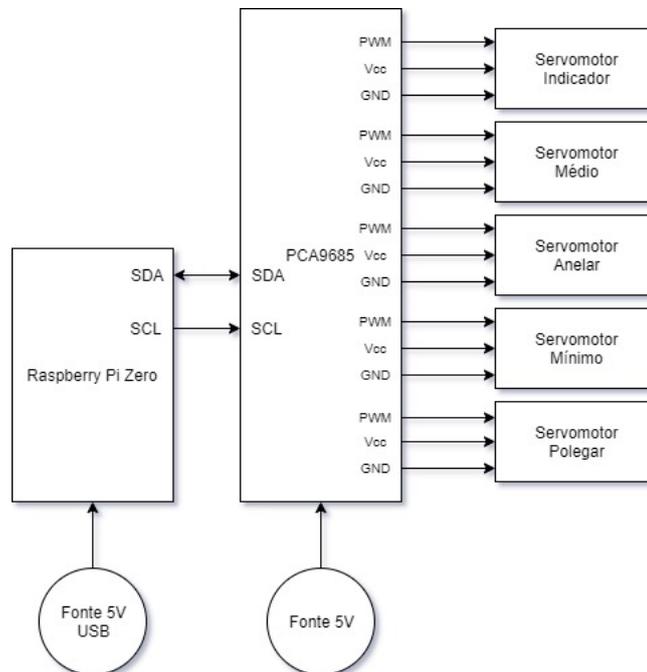
**Figura 20: Mão robótica finalizada. Fonte: autoria própria**

### 3.3.2 PROJETO DE HARDWARE DA MÃO ROBÓTICA

O controlador principal da mão robótica é o Raspberry Pi Zero W, que é responsável por rodar todo o software de controle e receber as informações externas para controle da mão robótica. Seu modo de comunicação é serial via bluetooth e pode ser acessado por um computador por linha de comando via wifi.

Para controle do servomotores é utilizado a placa de controle PWM PCA9685. Os sinais recebidos via serial pelo Raspberry Pi Zero W são tratados e enviados para a placa, que é responsável por fazer o movimento dos servomotores. O Raspberry Pi Zero W é alimentado por uma fonte micro USB de 5V e a placa PWM PCA9685 é alimentada por uma fonte padrão de 5V. Foi decidido não usar a mesma fonte para as duas placas para evitar comportamentos inesperados pelo Raspberry Pi Zero W devido a flutuações dos níveis de tensão causados pelo movimento dos servomotores. A figura 21 apresenta o diagrama de blocos do hardware da mão robótica.

Durante a construção da mão robótica foi necessário a simplificação do plano definido originalmente para as articulações

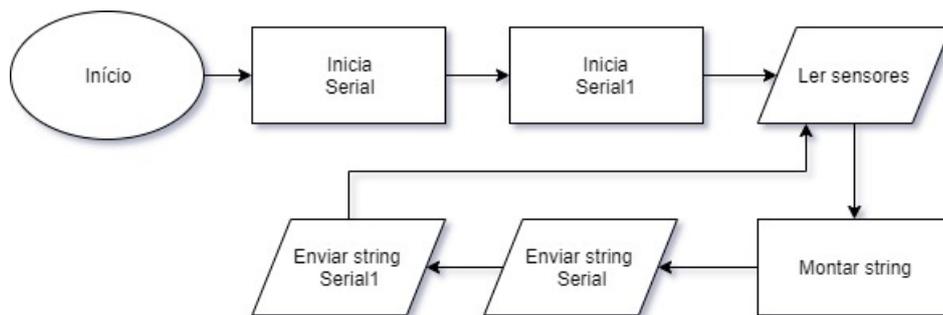


**Figura 21: Diagrama de blocos do hardware da mão robótica. Fonte: autoria própria**

### 3.4 PROJETO DE SOFTWARE E INTEGRAÇÃO DOS COMPONENTES

O software do projeto é dividido em duas partes: software de recebimento e envio via serial dos dados recebidos pelos sensores da luva realizado no Arduino Mega 2560 em linguagem C e o software de controle da mão robótica que roda no Raspberry Pi Zero W responsável por receber os dados via serial e realizar os comandos de controle dos servomotores, programado em linguagem Python

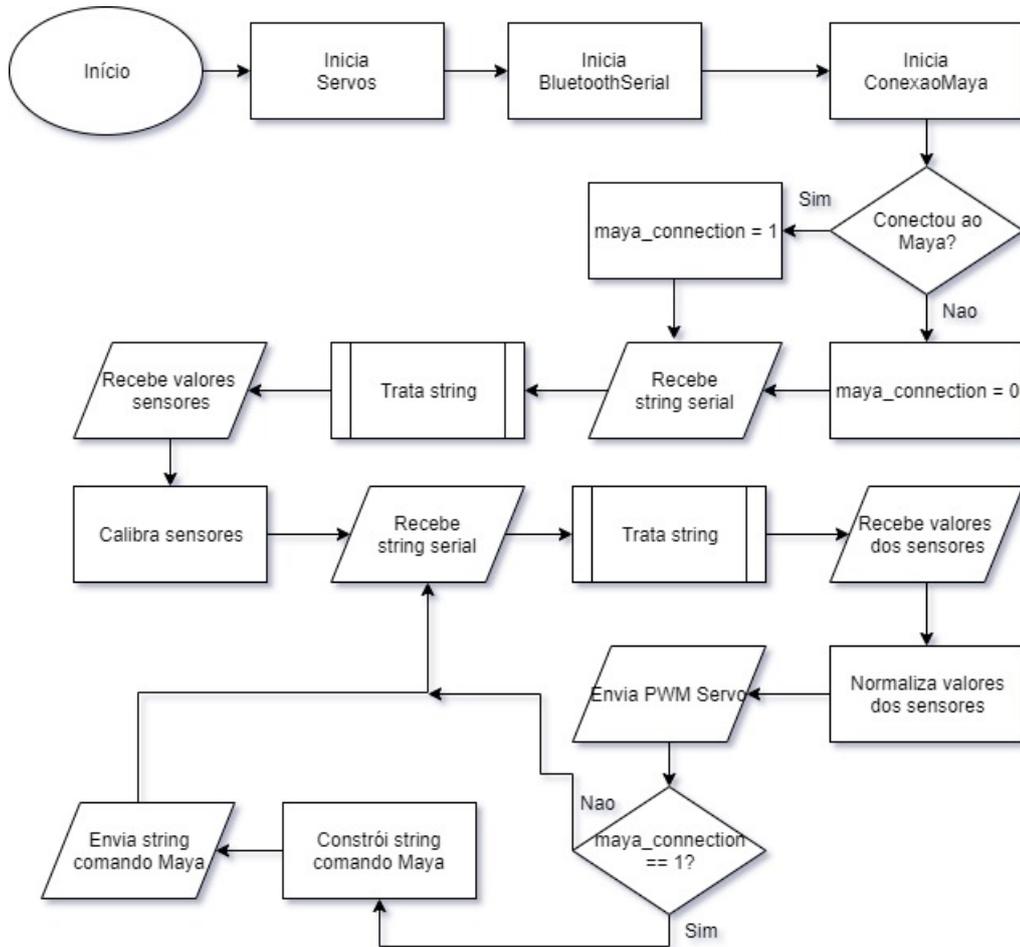
O fluxograma do código presente no Arduino Mega 2560 está apresentado na figura 22. Os dados dos sensores são lidos pelas 9 portas analógicas e os valores correspondentes às rotações x, y e z via I2C. Uma string é então montada e enviada para as portas Serial (USB) e Serial1(Bluetooth). Os dados enviados via USB podem ser recebidos por um computador para debug ou para visualização em software 3D.



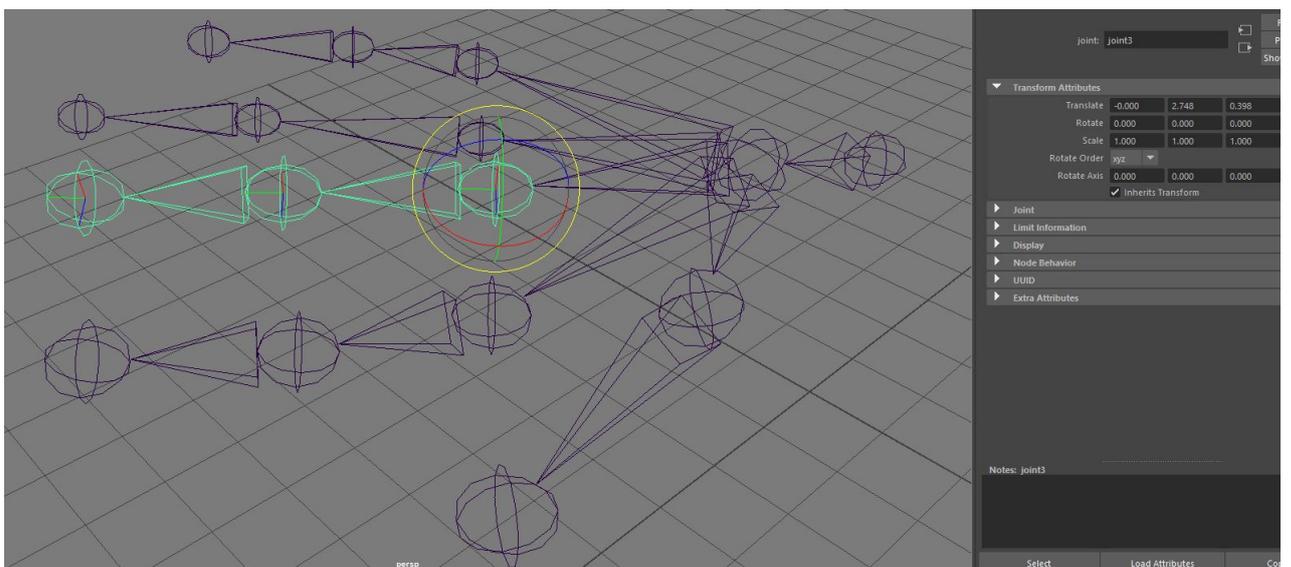
**Figura 22: Fluxograma do software presente no Arduino Mega 2560. Fonte: autoria própria**

Já o código presente no Raspberry Pi Zero W recebe os bytes enviados via Bluetooth e os trata para obter os valores para cada sensor, os valores são então normalizados em um intervalos de 0 a 180 para comandos enviados aos servomotores ou 0 a 90 para comandos enviados ao Software 3D. O fluxograma do software pode ser visto na figura 23.

O software 3D utilizado para visualização dos movimentos virtualmente é o Autodesk Maya. O método utilizado para transmissão de dados é via TCP/IP. Isso permite que um dispositivo conectado a mesma rede LAN do computador onde está rodando o Maya possa conectar ao mesmo facilmente e enviar comandos. No software desenvolvido para esse projeto foi utilizado o módulo Python socket, onde basta a abertura de uma conexão no respectivo endereço IP para envio de comandos. Dessa forma é possível a visualização dos movimentos capturados pela luva em tempo real em uma mão virtual, com a adição de movimentos não replicados pela mão robótica. Caso não esteja sendo o utilizado o software 3D ou a conexão não seja realizada por algum motivo, o software de controle continua sem a opção de visualização. A figura 24 apresenta a visualização da mão virtual em software 3D.



**Figura 23: Fluxograma do software presente no Raspberry Pi Zero W. Fonte: autoria própria**



**Figura 24: Mão virtual no software 3D Autodesk Maya. Fonte: autoria própria**

## 4 RESULTADOS

Os resultados com os testes da luva foram satisfatórios. Em primeiro momento houve a impressão de que os movimentos da mão robótica em relação a luva eram erráticos e irregulares, mas com demais depuração e refinamento do software foi possível conseguir os movimentos desejados. Existe certo atraso entre os movimentos da luva e os movimentos da mão devido a leitura serial via bluetooth e controle dos servomotores.

Na construção final da mão robótica foi necessário a simplificação do projeto original. Durante a construção foi observado que para realizar os movimentos do pulso seria necessário o movimento de toda a estrutura responsável pela flexão e extensão dos dedos, incluindo os servomotores e a base onde toda a montagem seria feita. Isso aumentaria consideravelmente a complexidade do projeto e necessitaria de servomotores de maior torque, assim como o projeto de um braço para realizar os movimentos.

Outra simplificação feita foi a flexão das articulações dos dedos tiveram que ser feitas de forma independente uma da outra. Seria necessário a modificação do projeto de impressão 3D da mão robótica para criar os pontos de fixação dos elásticos ou molas necessários para fazer a extensão ou flexão dos dedos sem o auxílio de servomotores, assim como maiores cálculos deveriam ser feitos no software para definir quando cada servo deveria tensionar ou relaxar suas respectivas linhas.

Devido à falta de tempo hábil para realização desses requisitos foi feita a retirada dos movimentos da articulação do pulso e foi simplificada a flexão das articulação para serem feitas de forma dependente, utilizando uma linha em cada face do dedo e as fixando no mesmo servomotor. Apontamos que no plano original estava especificado a possibilidade de ser necessária a simplificação do projeto da mão robótica.

Ademais, os demais requisitos foram todos alcançados. Em relação a luva capturadora de movimentos foram feitas a captura dos movimentos de todas as articulações prometidas, assim como as medidas de rotação da mão como um todo. Também foram feitos recursos adicionais como comunicação bluetooth entre a luva e mão robótica, possibilidade de utilização

da luva ou da mão robótica de forma independente, e a visualização dos movimentos da mão em software 3D, o que por sua vez também permite a observação dos dados capturados de orientação, já que os mesmos não são replicados pela mão robótica.

## 5 CRONOGRAMA E CUSTOS DO PROJETO

### 5.1 CRONOGRAMA PROPOSTO

O cronograma proposto é apresentado na tabela 1.

#### 5.1.1 CRONOGRAMA EXECUTADO

O cronograma final é apresentado na tabela 2 e o diagrama de Gantt na figura 25

Atividades	Setembro 09				Outubro 10				Novembro 11				Dezembro 12		
	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10
<i>Luva de dados</i>															
✓ Experimentação com sensores ópticos de flexão	1	2													
✓ Projeto da luva de dados			3	2											
✓ Compra de componentes				2											
✓ Construção dos sensores ópticos de flexão			3												
✓ Construção da luva				4	2	4									
✓ Teste da luva					3	1	1								
<i>Mão mecânica</i>															
✓ Definir o modelo de construção da mão				4	2										
✓ Obtenção das peças da mão mecânica															
✓ Obtenção dos servo motores					3										
✓ Teste dos conversores analógico digitais e busca de alternativas se necessário							2	1							
✓ Definir a fonte de alimentação do circuito									3						
✓ Integração da Luva de dados e software de controle										6					
✓ Desenvolvimento do software de controle										3	3				
<i>Integração entre Luva de dados e Mão mecânica</i>															
✓ Construção da mão mecânica											7				
✓ Fixação das linhas e servo motores											1	1	1		
✓ Teste do funcionamento das articulações												2			
✓ Teste da mão mecânica sem integração com a luva												2	2		
✓ Integração da Mão mecânica e software de controle											2	6			
✓ Testes da comunicação entre Luva e Mão											2	2	3	3	
<i>Atividades Gerenciais e Organizacionais</i>															
✓ Definição do Cronograma					3										
✓ Conclusão do planejamento					1										
✗ Edição do Blog (Posts, diagramas e imagens)		4													
✓ Controle de recursos			2				3			1	1	1	1		
✗ Preparação para apresentações												2			
✓ Elaboração do Relatório Final												5	3	2	

Figura 25: Cronograma final

### 5.2 CUSTOS

Os custos do projeto são apresentados na tabela 3

Atividades	Responsável	Auxiliar	Horas	Início	Fim			
			hora	folga	total	data	data	TOTAL
Luva de dados								
Experimentação com sensores ópticos de flexão	Joao	Caique	3	1	4	02/09	12/09	0
Projeto da luva de dados	Joao	Caique	3	2	5	10/09	12/09	0
Compra de componentes	Todos		3	1	4	12/09	13/09	
Construção dos sensores ópticos de flexão	Joao	Caique	3	1	4	13/09	17/09	0
Construção da luva	Todos		6	2	8	15/9	21/09	0
Teste da luva	Caique	Joao	4	2	6	21/9	23/09	0
Mão mecânica								
Definir o modelo de construção da mão	Todos		4	2	5	01/09	24/09	0
Obtenção das peças da mão mecânica	Todos		15	4	19	26/09	03/10	0
Obtenção dos servo motores	Todos		3	1	4	26/09	03/10	0
Teste dos conversores AD	Caique	Joao	2	1	3	26/09	03/10	0
Construção da mão mecânica	Todos		8	2	10	03/10	10/10	0
Fixação das linhas e servo motores	Joao	Caique	3	1	4	05/10	14/10	0
Teste do funcionamento das articulações	Caique	Joao	2	1	3	07/10	14/10	0
Teste da mão mecânica sem integração com a luva	Joao	Caique	3	1	4	14/10	22/10	0
Integração entre Luva de dados e Mão mecânica								
Definir a fonte de alimentação do circuito	Caique		3	1	3	23/09	25/09	0
Desenvolvimento do software de controle	Todos		12	5	17	23/09	22/10	0
Integração da Luva de dados e software de controle	Todos		6	2	8	23/09	22/10	0
	Todos		6	2	8	22/10	05/11	0
Testes da comunicação entre Luva e Mão	Joao	Caique	7	3	10	22/10	13/11	0
Atividades Gerenciais e Organizacionais								
Definição do Cronograma	Joao		3	1	4	02/09	08/09	0
Conclusão do planejamento	Joao	Caique	4	1	5	02/09	24/09	0
Edição do Blog (Posts, diagramas e imagens)	Todos		8	2	10	02/09	23/11	0
Controle de recursos	Todos		2	0	2	03/09	23/11	0
Preparação para apresentações	Caique	Joao	3	1	4	03/09	11/12	10
Elaboração do Relatório Final	Todos		6	2	8	13/11	26/11	6
Legenda dos responsáveis		Total				124		
			hora	folga	todos	s/folga	total	
		Joao	29	11	79	108	119	
		Caique	14	11	79	93	104	

Tabela 1: Cronograma proposto

<b>Atividades</b>	<b>Resp.</b>	<b>Auxiliar</b>	<b>Horas</b>	<b>Início</b>	<b>Fim</b>			
			hora	folga	total	data	data	TOTAL
Luva de dados								
Experimentação com sensores ópticos de flexão	Joao	Caique	3	1	4	02/09	12/09	3
Projeto da luva de dados	Joao	Caique	3	2	5	10/09	12/09	5
Compra de componentes	Todos		3	1	4	12/09	13/09	2
Construção dos sensores ópticos de flexão	Joao	Caique	3	1	4	13/09	17/09	3
Construção da luva	Todos		6	2	8	15/9	21/09	10
Teste da luva	Caique	Joao	4	2	6	21/9	23/09	5
Mão mecânica								
Definir o modelo de construção da mão	Todos		4	2	5	01/09	24/09	6
Obtenção das peças da mão mecânica	Todos		15	4	19	26/09	03/10	0
Obtenção dos servo motores	Todos		3	1	4	26/09	03/10	3
Teste dos conversores AD	Caique	Joao	2	1	3	26/09	03/10	3
Definir a fonte de alimentação do circuito	Caique		3	1	3	23/09	25/09	3
Integração da Luva de dados e software de controle	Todos		6	2	8	23/09	22/10	6
Desenvolvimento do software de controle	Todos		12	5	17	23/09	22/10	6
Integração entre Luva de dados e Mão mecânica								
Construção da mão mecânica	Todos		8	2	10	14/11	20/11	7
Fixação das linhas e servo motores	Joao	Caique	3	1	4	17/11	20/11	3
Teste do funcionamento das articulações	Caique	Joao	2	1	3	20/11	23/11	2
Teste da mão mecânica sem integração com a luva	Joao	Caique	3	1	4	14/10	23/11	4
Integração da Mão mecânica e software de controle	Todos		6	2	8	23/11	24/11	8
Testes da comunicação entre Luva e Mão	Joao	Caique	7	3	10	24/11	26/11	10
Atividades Gerenciais e Organizacionais								
Definição do Cronograma	Joao		3	1	4	02/09	08/09	3
Conclusão do planejamento	Joao	Caique	4	1	5	02/09	24/09	5
Edição do Blog (Posts, diagramas e imagens)	Todos		8	2	10	02/09	23/11	9
Controle de recursos	Todos		2	0	2	03/09	23/11	2
Preparação para apresentações	Caique	Joao	3	1	4	03/09	11/12	10
Elaboração do Relatório Final	Todos		6	2	8	13/11	26/11	6
Legenda dos responsáveis		Total				124		
			hora	folga	todos	s/folga	total	
		Joao	29	11	79	108	119	
		Caique	14	11	79	93	104	

**Tabela 2: Cronograma Final**

<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Pesquisa</b>	<b>Gasto Real</b>	<b>Substituição</b>	<b>Total</b>
Raspberry Pi	1	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Arduino Mega 2560	1	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Servomotores	10	\$8.00	\$15.00	\$0.00	\$150.00
IMU	1	\$25.00	\$25.00	\$0.00	\$25.00
Luva EPI	1	\$6.00	\$6.00	\$8.00	\$14.00
Leds	10	\$0.50	\$0.50	\$0.00	\$5.00
Tubo	1	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Ldr	10	\$0.20	\$0.20	\$5.00	\$7.00
Rolamentos 8mm	3	\$10.00	\$15.00	\$0.00	\$45.00
Rolamentos 3mm	11	\$6.00	\$7.00	\$0.00	\$77.00
Plástico ABS(kg)	1	\$120.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Impressão 3D	1	\$780.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Parafusos, resistores, etc	1	\$0.00	\$5.00	\$0.00	\$5.00
				Total	\$328.00

**Tabela 3: Tabela de custos**

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Ao final do projeto foi possível a realização de quase todos os requisitos de maneira satisfatória. Foram encontrados vários obstáculos durante a execução, sendo o mais grave a etapa de impressão das peças da mão robótica, que para ser feita comercialmente teria um valor inviável. Isso causou um considerável atraso na execução do cronograma planejado. Como solução conseguimos realizar as tarefas utilizando visualizações dos dados da luva utilizando software 3D até conseguirmos a impressão de forma gratuita dentro da própria Universidade. Outros obstáculos foram a compra de peças para montagem da mão robótica, o que fizeram com que fosse necessário algumas alterações no projeto obtido da internet e a construção da luva capturadora de movimentos requerer muito mais tempo do que antecipado.

Apesar dos obstáculos, e com algumas simplificações necessárias no projeto da mão robótica, chegamos a conclusão de que foi possível realizar o prometido durante o pré-projeto, considerando-se algumas alterações realizadas no cronograma planejado. Foi possível adquirir conhecimentos sobre tecnologias e atividades ainda não utilizadas pelos membros da equipe, com destaque para a utilização de impressão 3D e montagem de um dispositivo mecânico. Foi possível, também, a integração dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso.

### 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros é possível a melhoria da luva capturadora de dados com componentes mais avançados, como por exemplo sensores de flexão utilizando fibra óptica, que permitam a captura de todos os movimentos da mão. Outra possibilidade seria a criação de uma mão robótica totalmente do zero e que se enquadre melhor nos resultados desejados, com maior grau de liberdade de movimento. Essas e outras idéias compõem as nossas possíveis tentativas futuras de contribuir com o avanço nos campos de pesquisa em realidade virtual e próteses robóticas.

## REFERÊNCIAS

ARDUINO. **Getting Started with Arduino MEGA2560**. 2019. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoMega2560>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

GUANGZHOU HC INFORMATION TECHNOLOGY CO., LTD. **HC06 Datasheet**. Guangzhou, China, 2011.

INVENSENSE, INC. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4**. California, United States, 2013.

NXP SEMICONDUCTORS N.V. **PCA9685 Datasheet**. Eindhoven, Netherlands, 2015.

OPEN HAND PROJECT. **dextrus**. 2013. Disponível em: <<http://www.openhandproject.org/dextrus.php>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi Zero W**. 2019. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero-w/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

SUNROOM TECHNOLOGIES. **Light Dependent Resistor - LDR Datasheet**. California, United States, 2013.

SUN MICROSYSTEMS. Zimmerman. **Optical Flex Sensor**. 1985. 4,542,291, 17 set., 1985.