

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

*Campus* Divinópolis

Graduação em Engenharia Mecatrônica

Pedro Túlio Silveira Guimarães

CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DE UMA MÃO ARTIFICIAL  
ACIONADA POR SERVOMOTORES E CONTROLADA POR LUVA  
SENSORIZADA



Divinópolis

2019



Pedro Túlio Silveira Guimarães

CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DE UMA MÃO ARTIFICIAL  
ACIONADA POR SERVOMOTORES E CONTROLADA POR LUVA  
SENSORIZADA

Relatório final de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à comissão avaliadora do curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção da aprovação na disciplina de TCC II.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio Oliveira

Coorientador: Prof. Me. Daniel Morais dos Reis



Divinópolis

2019



Pedro Túlio Silveira Guimarães

CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO DE UMA MÃO ARTIFICIAL  
ACIONADA POR SERVOMOTORES E CONTROLADA POR LUVA  
SENSORIZADA

Relatório final de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à comissão avaliadora do curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção da aprovação na disciplina de TCC II.

Eixos de formação: Eletrônica, Mecânica e Computação.

Comissão Avaliadora:

Prof. Dr. Luiz Claudio Oliveira

CEFET/MG *Campus V*

Prof. Me. Michel Pires da Silva

CEFET/MG *Campus V*

Prof. Me. Daniel Moraes dos Reis

CEFET/MG *Campus V*

Eng. Lucas Arantes Lemos Oliveira

CEFET/MG *Campus V*

Divinópolis

2019



À MINHA MÃE.



# Agradecimentos

Agradeço,

a Deus pela minha vida e por me permitir alcançar mais este objetivo;

à minha mãe por todo amor que me deu em vida e por tudo que fez pela minha criação e que, mesmo não estando comigo durante a minha graduação, foi a responsável indiretamente por isso e por formar o caráter da pessoa que sou hoje;

à minha tia Zilda por todo amor, suporte e atenção durante as fases mais difíceis da minha vida onde sempre esteve, por perto ou de longe, me dando todo apoio;

aos professores Luiz Claudio e Daniel pela orientação e pelos conhecimentos para realização do presente trabalho;

às minhas amigas que a graduação me presenteou: Cláudia Barbosa, Giulia Vaz pela amizade e apoio durante os anos de curso;

às minhas primas Ana Paula, Jéssica e Roberta por todos os momentos de boas risadas e diversão que serviram como um renovador de energias durante o processo para chegar até aqui;

à minha madrinha Cida e às minhas tias Dalva, Geralda, Graça e Lurdinha pelo suporte após a perda de minha mãe;

a todos aqueles que de alguma forma contribuíram com o meu progresso, em especial: professores da instituição, funcionários da limpeza, funcionários do restaurante e técnicos administrativos.



Só se pode alcançar um grande êxito quando nos  
mantemos fiéis a nós mesmos.

Friedrich Nietzsche



## Resumo

O trabalho de monografia tratado no presente documento aborda a construção de um protótipo robótico com formato remetente a uma mão humana. Este é acionado por servomotores e controlado por uma luva instrumentada com sensores flexíveis resistivos. Esses sensores possuem a função de medir os movimentos da mão do usuário para então serem utilizados como base para realizar a movimentação da estrutura da mão artificial. Os sensores de flexão variam suas resistências conforme são flexionados, com isso ao posicioná-los sobre os dedos pode-se associar essa variação com os movimentos de flexão e extensão realizados pelos dedos do usuário da luva e reproduzi-los na estrutura da mão artificial através do tratamento via código das medições realizadas pelos sensores. A comunicação entre os sensores e o protótipo é intermediada por um ESP32, o qual realiza o tratamento dos dados coletados e, com base neles, executa o acionamento dos servomotores a fim de movimentar os dedos do dispositivo. O protótipo também conta com um aplicativo via Web para acesso e visualização de dados referentes ao dispositivo. A ideia para o trabalho surgiu com o objetivo de acionar dispositivos com o movimento de determinada parte do corpo humano, neste caso o da mão humana, e também propor soluções para problemas encontrados em ambientes industriais como por exemplo: realização de atividades onde o contato direto representa risco ao operador, atuação em processos realizados sob condições extremas (elevadas/baixas temperaturas e pressões) e demais tarefas que necessitam de uma distância segura para serem realizadas.

Palavras-chave: sensor flexível resistivo, mão robótica, luva sensorizada.



## Abstract

The monograph work dealt with in this paper deals with the construction of a robotic prototype with a human hand format. This is driven by servomotors and controlled by an instrumented sleeve with resistive flexible sensors. These sensors have the function of measuring the hand movements of the user and then they can be used as a base to move the artificial hand structure. Flexion sensors vary their strengths as they are flexed, so positioning them over the fingers can associate this variation with the flexion and extension movements performed by the glove user's fingers and reproduce them in the artificial hand structure through the treatment via code of the measurements made by the sensors. Communication between the sensors and the prototype is mediated by an ESP32, which performs the processing of the collected data and, based on them, drives the servomotors in order to move the fingers of the device. The prototype also has a web application for accessing and viewing data regarding the device. The idea for the work came up with the objective of triggering devices with the movement of a certain part of the human body, in this case the human hand, and also proposing solutions to problems found in industrial environments such as performing activities where direct contact it represents a risk to the operator, performance in processes performed under extreme conditions (high / low temperatures and pressures) and other tasks that require a safe distance to be performed.

Keywords: flexible resistive sensor; robotic hand; sensed glove.



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Definição do Problema	2
1.2	Objetivos Gerais	3
1.3	Objetivos Específicos	3
1.4	Motivação	4
1.5	Estado da arte	4
<b>2</b>	<b>Fundamentos</b>	<b>7</b>
2.1	Revisão de Literatura	7
2.2	Fundamentação Teórica	11
2.2.1	<b>Impressão 3D</b>	11
2.2.2	<b>Atuador</b>	12
2.2.3	<b>Sensor Flexível Resistivo 4.5” SEM-08606</b>	14
2.2.3.1	<b>Princípio de funcionamento e fabricação</b>	15
2.2.3.2	<b>Propriedades e Caracterização Elétrica</b>	16
2.2.3.3	<b>Circuito de Condicionamento</b>	17
2.2.3.4	<b>Medições de Atividade Física</b>	17
2.2.4	<b>Rede de Computadores</b>	18
2.2.5	<b>Protocolos de Rede</b>	19
2.2.6	<b>Servidor Web</b>	22
2.2.7	<b>Banco de Dados</b>	23
2.2.8	<b>ESP32</b>	24

<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>27</b>
3.1	Implementação Eletrônica	28
3.1.1	Luva sensorizada (medição do movimento)	28
3.1.2	Circuito eletrônico dos sensores	29
3.2	Tratamento de dados no ESP32	31
3.3	Sistema de acionamento e estruturas mecânicas	31
3.4	Aplicação <i>Web</i>	36
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>39</b>
4.1	Sensores	39
4.2	Circuito Divisor de tensão	43
4.3	Protótipo	44
4.4	Aplicação <i>Web</i>	47
<b>5</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>51</b>
5.1	Conclusões	51
5.2	Proposta de Continuidade	53
	<b>Bibliografia</b>	<b>55</b>

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Estrutura de uma impressora. . . . .	12
Figura 2.2 – Servomotor TowerPro® modelo MG 946R. . . . .	13
Figura 2.3 – Variação angular do eixo do servomotor conforme a largura de pulso. . . . .	14
Figura 2.4 – Sensor flexível resistivo 4,5” SEM-08606. . . . .	15
Figura 2.5 – Rede cliente-servidor. . . . .	19
Figura 2.6 – Funcionamento Protocolo de Rede. . . . .	19
Figura 2.7 – Arquitetura do Protocolo TCP/IP (PALMA; PRATES, 2000). . . . .	20
Figura 2.8 – Sistema Banco de Dados (COOPERATI, 2019). . . . .	23
Figura 2.9 – Estrutura do ESP32. . . . .	25
Figura 3.1 – Diagrama de funcionamento do dispositivo. . . . .	27
Figura 3.2 – Procedimento de medição da variação de resistência dos sensores. . . . .	29
Figura 3.3 – Circuito eletrônico para aquisição de dados dos sensores pelo ESP32. . . . .	30
Figura 3.4 – Circuito de acionamento dos servomotores no ESP32. . . . .	32
Figura 3.5 – Mão robótica Ada, da Open Bionics. . . . .	33
Figura 3.6 – Mão robótica do projeto InMoov. . . . .	33
Figura 3.7 – Modelo representativo da mão InMoov destacando os 16 DOFs. . . . .	34
Figura 3.8 – Estrutura do antebraço para acoplamento dos servomotores. . . . .	34
Figura 3.9 – Estrutura dos dedos da mão mecânica. . . . .	35
Figura 3.10 – Canais internos da palma da mão para passagem dos tendões. . . . .	35
Figura 3.11 – Conjunto de polias que realizam a manipulação dos tendões. . . . .	36
Figura 3.12 – Notação de diagrama de caso de uso. . . . .	37

Figura 3.13–Diagrama de caso de uso do dispositivo. . . . .	37
Figura 4.1 – Curva de variação dos sensores. . . . .	39
Figura 4.2 – Curva de variação dos sensores. . . . .	40
Figura 4.3 – Comparação entre as curvas de Extensão e Flexão dos Sensores . . . . .	42
Figura 4.4 – Luva sensorizada. . . . .	44
Figura 4.5 – Estrutura da mão artificial. . . . .	45
Figura 4.6 – Conexões dos tendões aos servomotores. . . . .	45
Figura 4.7 – Testes realizados com o dispositivo. . . . .	46
Figura 4.8 – Tela de Login. . . . .	47
Figura 4.9 – Tela de cadastro de usuários. . . . .	47
Figura 4.10–Modelo Entidade Relacionamento. . . . .	48
Figura 4.11–Modelo Entidade Relacionamento. . . . .	49

# Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Materiais e Componentes . . . . .	28
Tabela 4.1 – Medições dos Sensores - Procedimento de Extensão . . . . .	40
Tabela 4.2 – Medições dos Sensores - Procedimento de Flexão . . . . .	41
Tabela 4.3 – Valores dos Limites da Resistência dos Sensores . . . . .	43
Tabela 4.4 – Valores de entrada analógica, saída digital e variação angular dos servos. . . . .	44



## Lista de acrônimos e notações

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Desenho Assistido por Computador, do inglês <i>Computer Aided Design</i>
CDDL	Licença Comum de Desenvolvimento e Distribuição, do inglês <i>Common Development and Distribution License</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado, do inglês <i>Computer Numeric Control</i>
DNS	Sistema de Nomes e Domínios, do inglês <i>Domain Name System</i>
DOF	Graus de Liberdade, do inglês <i>Degrees of Freedom</i>
EE	<i>Enterprise Edition</i>
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês <i>Integrated Development Environment</i>
IP	Protocolo da Internet, do inglês <i>Internet Protocol</i>
LAN	Rede Local, do inglês <i>Local Area Network</i>
NetBEUI	Interface de Usuário Estendida NetBIOS, do inglês <i>NetBIOS Extended User Interface</i>
PLA	Poliácido Láctico

PWM	Modulação de Largura de Pulso, do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>
”R.U.R.”	Robôs Universais de Rossum, do inglês <i>”Rossum’s Universal Robots”</i>
SFR	Sensor Flexível Resistivo
SGBD	Sistemas de Gestão de Base de Dados
SPX	Troca de Pacotes entre Redes/Troca de Pacotes Sequenciados, do inglês <i>Internetwork Packet Exchange/Sequenced Packet Exchange</i>
SQL	Linguagem de Consulta Estruturada, do inglês <i>Structured Query Language</i>
TCP	Protocolo de Controle de Transmissão, do inglês <i>Transmission Control Protocol</i>
UML	Linguagem de Modelagem Unificada, do inglês <i>Unified Modeling Language</i>
WAN	Rede de Longa Distância, do inglês <i>Wide Area Network</i>

## Introdução

A utilização de robôs vem se consolidando no decorrer dos últimos anos e cada vez mais é possível notar a presença destes, seja em se tratando de contextos industriais ou mesmo em situações cotidianas. Muito disto se deve à suas capacidades de realizar atividades que proporcionam conforto e comodidade ao homem e também de solucionar tarefas tidas como desafios. Isso provém de trabalhos e estudos de engenharia produzidos a partir de conhecimentos específicos, em áreas a serem tratadas no parágrafo seguinte, acumulados nas décadas mais recentes com o advento de novas tecnologias.

No contexto referido está a robótica, nome dado ao ramo que trata de sistemas tecnológicos que possuem partes mecânicas motorizadas operadas manualmente ou utilizando-se de circuitos integrados. Se baseia na relação existente entre três áreas dos conhecimentos que compõem a Mecatrônica: mecânica, eletrônica e computação (WOLF et al., 2009). Áreas estas abordadas com profundidade durante o decorrer do curso de Engenharia Mecatrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Aplicações relevantes em robótica começaram surgir em torno de 1960, sendo em sua maioria, orientadas para o ambiente industrial (ENGELBERGER, 1995).

A tecnologia da teleoperação foi desenvolvida inicialmente como uma solução para o manuseio de materiais radioativos. Atualmente, uma aplicação muito observada da robótica consiste na utilização de robôs controlados de forma remota que desenvolvem em suas atividades, tarefas antes realizadas diretamente por seres humanos. Há também uma crescente em pesquisas que visam desenvolver aplicações relacionadas ao controle de dispositivos biomecânicos devido a seu grande potencial para tal (COUTO PITTA et al., 2018).

Robôs ditos teleoperados são aqueles que atuam conforme recebem algum comando externo enviado por um operador. Há casos em que esses comandos são provenientes de movimentos realizados por uma pessoa, com a finalidade de que o dispositivo se comporte similarmente ao ser humano ao executar determinada atividade (MANSEUR; BEARDEN; KELBERT, 1992). Segundo Turner et al. (2000), tais sistemas são do tipo mestre/escravo, onde o escravo é o dispositivo que se deseja operar e o mestre é o controle manual operado diretamente por um ser humano.

Segundo Maciel, Silva e Barbosa (2007), é mais comum encontrar robôs manipulados remotamente ou teleoperados em linhas de produção automotivas, tarefas em ambientes remotos ou perigosos (espaciais, oceânicos, etc.), atividades domésticas, cirurgias médicas, entre outros.

Neste sentido, o presente trabalho vem tratar de um manipulador robótico no formato de uma mão humana cuja função é justamente executar movimentos pertinentes ao membro referido, de forma mais natural e correspondente possível. Para a construção de um dispositivo nos termos mencionados é necessário que sejam aplicadas técnicas referentes aos campos de atuação inerentes, que no caso são as áreas já citadas anteriormente como sendo aquelas que constituem parte da Mecatrônica.

## 1.1 Definição do Problema

O problema fundamental de que trata esta monografia se refere a um conjunto de atividades de trabalho onde o trabalhador está sujeito a riscos de saúde e exposto a situações de perigo no desenvolvimento de seu ofício. Tem-se como exemplo: manuseio de compostos químicos, choques mecânicos, processos cortantes, ambientes com condições nocivas como elevadas temperaturas ou mesmo em situações que a presença humana sem uma série de equipamentos de suporte a vida seria impossível, como é o caso de tarefas realizadas externamente em estações espaciais em que atividades são realizadas em atmosferas não suportadas por seres humanos como, por exemplo, o vácuo. Há também situações onde a capacidade humana é insuficiente ou limitada e se demanda por exemplo o emprego de força elevada na alocação ou manipulação de cargas e objetos de massa elevada.

Com isso o desafio deste trabalho consiste em realizar a comunicação entre as infor-

mações coletadas pelos sensores da luva e os servomotores, com a finalidade de conferir à estrutura do manipulador mecânico os movimentos realizados por uma mão humana. A proposta aqui tratado diz respeito a elaborar possíveis soluções de engenharia que contribuam com conhecimentos científicos e que possam permitir maior versatilidade na execução de processos industriais diversos e propor as devidas soluções para as situações apresentadas a seguir como sendo os problemas a serem tratados.

## 1.2 Objetivos Gerais

O presente trabalho de monografia possui como objetivo construir um protótipo articulado remetente à mão humana, atuado remotamente por uma luva controladora sensorizada.

## 1.3 Objetivos Específicos

- Construir um protótipo de uma mão mecânica articulada que permita a realização de movimentos básicos correspondentes aos da mão humana real (abrir e fechar os dedos);
- Instrumentar uma luva com sensores resistivos cuja resistência varia conforme sofrem flexão;
- Desenvolver o circuito de condicionamento do sinal coletado pelos sensores a fim de permitir que o dispositivo de aquisição de dados realize a medição de forma exata e correta;
- Realizar a comunicação entre o circuito eletrônico desenvolvido e a parte mecânica construída, utilizando para isto os comandos elétricos provenientes do circuito de acionamento eletrônico com base nos dados coletados pelos sensores, para acionar servomotores que serão responsáveis pela movimentação dos dedos do protótipo mecânico por meio de cabos interconectados a esses;
- Executar tarefas básicas como segurar objetos e realizar gestos para atestar o funcionamento do dispositivo.

## 1.4 Motivação

A ideia de produzir uma máquina capaz de reproduzir os movimentos de uma mão humana vem de necessidades como manusear substâncias nocivas à saúde humana, como é o caso de processos laboratoriais onde o operador atua na manipulação de reagentes químicos. Também em tarefas onde o acesso de pessoas não é permitido ou possível devido à dificuldade de alcance. Do mesmo modo, há situações como o trabalho em áreas de insalubridade ou em ambientes expostos a condições extremas como elevadas ou baixas temperaturas e pressões como são os casos de atividades realizadas no mar sob profundidades críticas. Similarmente existem as estações espaciais que por vezes requerem operações sob tais condições.

A motivação do trabalho acadêmico aqui tratado é justamente gerar potenciais formas de se solucionar diversos tipos de processos, sejam eles industriais ou não, a fim de conferir-lhes maiores eficiência e eficácia, bem como promover a inclusão de tecnologias que possibilitam maiores segurança e agilidade a processos produtivos. Juntamente com estes fatores, também há a motivação no âmbito econômico, visando o aumento da produção se for esta a aplicação, a melhoria na qualidade do produto ou ação a ser desenvolvida utilizando os princípios do protótipo bem como oferecer alternativas mais seguras para realização de ofícios diversos.

## 1.5 Estado da arte

Os robôs operados a distância, ou teleoperados, existentes atualmente são modelos que fornecem recursos para a execução de atividades humanas que são desempenhadas geralmente em ambientes com condições impróprias ou que oferecem risco ao trabalho humano (MACIEL; SILVA; BARBOSA, 2007).

Couto Pitta et al. (2018) desenvolveram na Faculdade de Tecnologia Termomecânica (FTT-CEFSA) em São Bernardo do Campo e no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP) em São Paulo, um protótipo biomecânico de uma luva sensorizada para o controle de uma mão robótica sub-atuada à distância. Utilizaram sensores resistivos variantes por flexão para interpretar os movimentos dos dedos da mão humana e convertê-los em sinais elétricos, para então enviá-los a um controlador central encarregado de realizar o acionamento dos motores do robô.

Numa parceria entre a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), a Universidade Presidente Antônio Carlos (UNIPAC) - Campus Bom Despacho e o Centro Universitário de Formiga (UNIFOR-MG), Coelho et al. (2011) desenvolveram um sistema de captura de baixo custo dos movimentos do conjunto punho-mão. Os autores utilizaram um sistema integrando o software Arduino e os sensores flexíveis e então realizaram a implementação de um programa para interpretar as informações provenientes dos sensores.

Os pesquisadores Souza, Oliveira e Circuncisão Alves (2015) desenvolveram uma mão robótica capaz de reproduzir movimentos de uma mão humana a fim de possibilitar o trabalho em ambientes insalubres. A atuação foi feita de maneira remota por uma luva. Os sinais foram coletados na luva por meio de SFRs e processados pelo Arduino, este com a função de enviar os comandos para acionar os servomotores responsáveis pela movimentação dos dedos da mão robótica. A mão foi confeccionada utilizando uma impressora 3D e o sistema alimentado com uma bateria de 5 volts.



## Fundamentos

### 2.1 Revisão de Literatura

O desejo de se produzir mecanismos capazes de substituir ou auxiliar a atuação humana, nos mais diversos processos, existe desde os primórdios da civilização. No antigo Egito, sacerdotes construíram os primeiros braços mecânicos, os quais eram colocados em estátuas de deuses com a pretensão de que estes os atuassem a fim de impressionar o povo com o poder desse deus (PAZOS, 2002).

No entanto, a ideia de se construir robôs começa a tomar força somente no início do século XX com as necessidades de aumentar a produtividade e melhorar a qualidade dos produtos. O termo robô surge neste período, derivado da palavra tcheca *"robot"*, que significa trabalhador forçado. O responsável pela invenção do vocábulo foi Karel Capek em sua obra "R.U.R." (do inglês *"Rossum's Universal Robots"*), publicada em 1920 (PAZOS, 2002).

Contudo, o suporte técnico e científico para a elaboração de robôs com as configurações encontradas no atual cenário industrial só começou a ser desenvolvido em meados do século XX, logo após a Segunda Guerra Mundial, mais especificamente entre o final da década de 40 e início da de 50, quando foi introduzido o equipamento denominado teleoperador *"master-slave"*, desenvolvido por Raymond Goertz. Este foi utilizado para realizar atividades envolvendo materiais radioativos. O sistema constituía de um manipulador *"master"*, o qual era operado por um humano que determinava os movimentos a serem executados, e um manipulador *"slave"*, responsável por atuar de forma correspondente aos movimentos remotos realizados pelo *"master"*. As interações entre *"master"* e

"*slave*" se davam através de transmissões mecânicas (FU; GONZALEZ; LEE, 1987).

Isto só foi possível devido ao desenvolvimento das tecnologias do comando numérico e do telecomando, que foram predecessoras da robótica. O comando numérico foi desenvolvido segundo as premissas de John Parsons. Este desenvolveu um método para controle de trajetória, juntamente com o MIT (Massachusetts Institute of Technology), com base nos seguintes passos:

- uso de um computador para cálculo de trajetória de ferramenta e armazenamento destes dados em cartões perfurados;
- uso de dispositivo para ler os dados armazenados nos cartões perfurados uso de sistema de controle que fornece de forma contínua dados para acionamento dos motores de acionamento.

Essa tecnologia, como já mencionado, foi e é utilizada para o acionamento de máquinas programadas por números através de sua inserção por meio de um teclado ou leitura de cartão perfurado. A função destes números consistia em determinar, por exemplo, as posições adequadas de ferramentas durante a realização de tarefas de usinagem numa peça (PAZOS, 2002).

A tecnologia do telecomando por sua vez trata do uso de um manipulador remoto utilizado pelo ser humano para controlar determinado processo ou ação. Pazos (2002) conceitua o manipulador como sendo um dispositivo, geralmente eletromecânico, que atua conforme movimentos comandados remotamente por um ser humano. Esses movimentos são apontados por um operador utilizando-se de um *joystick* ou aparelho semelhante com a função de transmitir os comandos desejados de forma adequada. O telecomando tem importante utilidade na realização de tarefas que envolvem, por exemplo, substâncias nocivas como materiais radioativos, tóxicos ou explosivos. Nesses casos o operador pode exercer suas atividades a uma distância segura.

Após Goertz ter desenvolvido o primeiro teleoperador, os conhecimentos em teleoperação passaram por diversas etapas de compreensão da interação entre o humano e manipuladores robóticos nos últimos anos (HOKAYEM; SPONG, 2006).

A utilização de gestos e seu reconhecimento tem se mostrado uma peça chave para a comunicação entre homens e máquinas. Este reconhecimento em geral é realizado com o auxílio de sensores de vídeo e movimento, que se tornaram bastante comuns em jogos de

videogame e que permitem detectar os gestos realizados pelo usuário e executar ações a partir deles (JIN et al., 2011).

Contudo, esta técnica exibe certas restrições como a limitação de espaço, dependência da luminosidade e demais condições ambientais. Por outro lado, há técnicas com as quais o movimento é capturado por sensores acoplados diretamente no usuário, o que fornece uma maior cobertura dos movimentos. Isso também evita que os movimentos reconhecidos pelos sensores sejam afetados pelo ambiente, o que oferece vantagens em relação ao reconhecimento por vídeo (J.-H. KIM; THANG; T.-S. KIM, 2009). Um exemplo deste tipo de aplicação é representado pelas luvas para medição de gestos. Estes dispositivos são baseados em sensores de movimento como acelerômetros, giroscópios, sensores de curvatura e pressão.

Um modelo de sensor que permite a detecção de movimentos são os chamados sensores piezoresistivos. A característica piezoresistiva de determinado material consiste da capacidade de alterar o valor de sua resistência conforme aplicado sobre ele determinada tensão ou deformação (PEREIRA, 2009).

A piezoresistividade foi descoberta em 1856, por Lord Kelvin quando este percebeu a mudança da resistência elétrica sofrida por um sensor elétrico ao ser exposto a tensão ou deformação (SUGIYAMA; TAKIGAWA; IGARASHI, 1983). De acordo com Rizvi e Nanguib (2014), diversos materiais podem exibir o efeito piezoresistivo, como semicondutores, materiais compósitos e metais. Segundo Webster (1988 apud CARVALHO, 2014), este efeito consiste na alteração da distância média entre as partículas do material condutor ao sofrer determinada deformação, que resulta na variação de sua resistência elétrica.

Trabalhos vêm sendo realizados nas últimas décadas com base nas áreas descritas nos primeiros parágrafos desta seção e na integralização destas. Os pesquisadores Maciel, Silva e Barbosa (2007) elaboraram um protótipo de luva sensorizada visando o controle à distância de equipamentos. Para isso, foram utilizados sensores resistivos para captar os movimentos dos dedos e convertê-los em sinais elétricos a fim de acionar, com estes, uma mão mecânica. Os sinais provenientes dos sensores foram tratados por um PIC16F87, responsável por atuar os servomotores de acionamento de articulações representando dedos humanos.

Longaretti (2015) desenvolveu, na Universidade Federal do Pampa (Unipampa) em Alegrete, uma luva para captura de gestos da mão humana utilizando um protótipo equi-

pado com sensores MPU6050 contendo acelerômetros e giroscópios, ambos em três eixos. Os dados coletados pelos sensores eram enviados a um computador, onde foram submetidos a análises e tratamento de dados.

Na Universidade Federal do Vale do Paraíba (UNIVAP), Albernaz (2015) projetou uma mão mecânica com a capacidade de repetir os movimentos realizados por uma mão humana. Utilizou uma luva sensível para captar as articulações dos dedos e assim transmitir os dados coletados para a estrutura mecânica composta por cinco dedos. Objetivou com isso, substituir a atuação humana direta ao realizar atividades de risco a fim de preservar a integridade do trabalhador.

Saggio, Riillo et al. (2015), na *University of Rome 'Tor Vergata'*, realizaram pesquisas acerca de SFRs, abordando princípios de funcionamento, aspectos de fabricação, características elétricas, modelos equivalentes, circuitos de condicionamento de sinal e aspectos físico-bioquímicos. Dedicaram-se a analisar e reportar aplicações destes sensores relacionadas com dispositivos de interação por gestos, com a medição de posição e movimento do corpo humano e o desenvolvimento de dispositivos artificiais direcionados a aplicações nos campos automotivos, robótico e de próteses.

Na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), em Ponta Grossa, Nascimento et al. (2017) apresentaram uma metodologia para caracterizar um SFR, ou como o autor denomina, sensor *FlexForce*. Para isso, apresentaram conceitos tratando sobre o sensor em questão, bem como realizaram experimentos e análise dos dados obtidos para obter o comportamento entre resistência e flexão.

Ribeiro (2015) propôs uma mão biônica controlada luva de sensores para realizar atividades de teleoperação, na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) em João Monlevade. Realizou a construção da mão biônica em PLA (Poliácido Láctico) por meio de impressão 3D. Os sensores utilizados foram sensores resistivos variáveis de acordo com a flexão exercida sobre esses. A atuação dos dedos da mão mecânica foi realizada utilizando dispositivos servomotores.

## 2.2 Fundamentação Teórica

Para a realização do presente trabalho necessita-se de conhecimentos relacionados aos movimentos da mão humana e a forma de convertê-los em sinais elétricos a fim de utilizá-los como base para executar determinadas ações. Neste capítulo são explicados de forma objetiva os conceitos abordados para tal.

### 2.2.1 Impressão 3D

Para a construção da estrutura da mão artificial está prevista a utilização do método de impressão 3D. Há vários trabalhos referentes a próteses de mão, os quais viabilizam inúmeros modelos físicos representativos da mão humana. Contudo, segundo Smagt et al. (2009), é primordial que o mecanismo seja uma representação fiel da mão humana e de suas propriedades e não simplesmente uma estrutura intrínseca da mão.

O modo de operação de uma impressora 3D consiste basicamente na extrusão plástica e sua deposição em camadas. As impressoras 3D funcionam de forma oposta às máquinas de usinagem CNC (do inglês *Computer Numeric Control*), porém possuem objetivos similares. Enquanto as impressoras operam segundo o princípio de deposição de material, as máquinas CNC realizam a remoção de material.

A impressora é composta por uma mesa deslizante que se desloca ao longo do eixo Y e por um bico extrusor que se movimenta ao longo do eixo X. Pode também possuir regulação de altura, esta é feita ao longo do eixo Z. O controle da posição da mesa e da temperatura do bico extrusor é feito por um circuito eletrônico e a movimentação da mesa é realizada por motores de passo (AZEVEDO et al., 2013). Na Figura 2.1 é mostrada a estrutura geral de uma impressora 3D.

Impressoras 3D tem a capacidade de produzir peças a partir de seu desenho tridimensional digital. Para isso, o desenho geralmente é produzido utilizando-se um software CAD (do inglês *Computer Aided Design*) e seu arquivo deve estar no formato “.stl”. O que o esse formato de arquivo faz é basicamente descrever a superfície do objeto desenhado através dos vértices que compõem cada uma de suas faces.

Os materiais que geralmente são utilizados para impressões 3D são o PLA e o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno). Segundo Puaux et al. (2007), o PLA é um polímero bem promissor pois possui baixa toxicidade e excelentes propriedades mecânicas. Pode

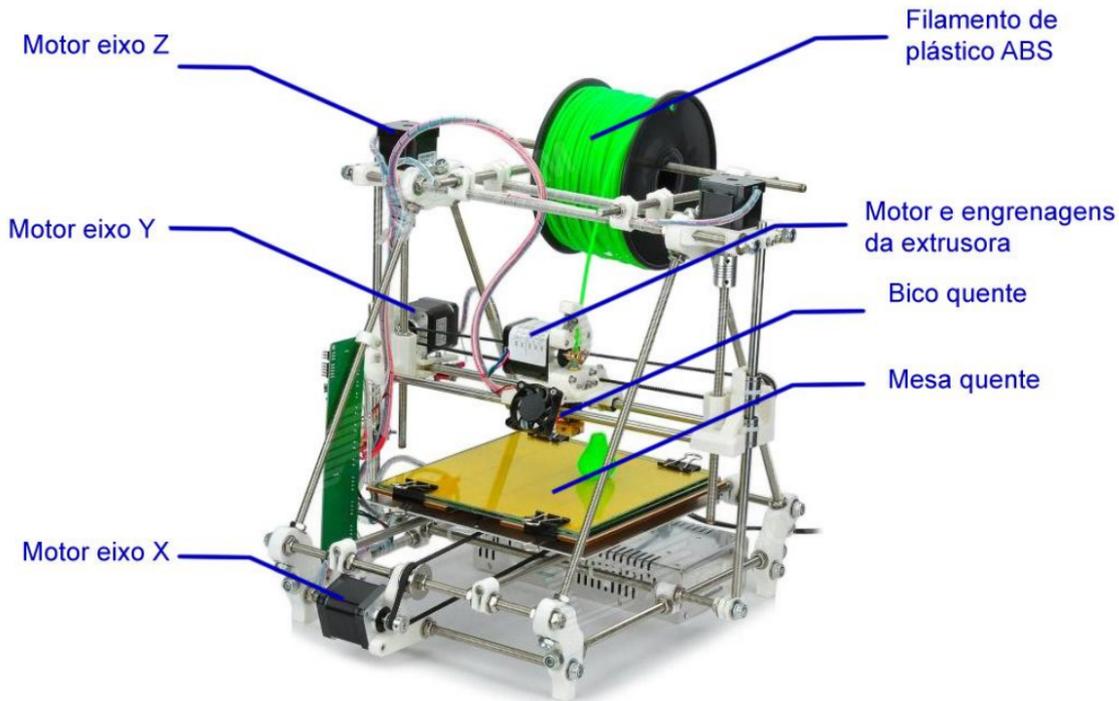


Figura 2.1 – Estrutura de uma impressora.  
Fonte: (AZEVEDO et al., 2013).

ser produzido a partir de um ácido orgânico proveniente do milho e de outros amidos renováveis, o que faz deste um material biodegradável.

Já o ABS é provavelmente o mais utilizado e mais facilmente encontrado. Possui menor custo, é mais resistente se comparado ao PLA, o que faz com que as peças produzidas possuam maior durabilidade, tem também maior facilidade de extrusão e é mais resistente à elevadas temperaturas. Essas características fazem do ABS um ótimo material para aplicações de engenharia (GODOY, 2018).

### 2.2.2 Atuador

Existe uma infinidade de mecanismos que podem ser utilizados como atuadores de sistemas eletromecânicos. Para a aplicação requerida no presente trabalho serão utilizados servomotores do tipo mostrado na Figura 2.2.

Os servomotores possuem um sensor (*encoder*) que é basicamente um medidor de posição, apesar de também ser possível utilizá-lo para medição de velocidade. Este geralmente consiste num potenciômetro que está acoplado junto ao eixo do motor. O rastreamento da posição é feito associando a resistência elétrica do potenciômetro com a posição do eixo do motor (MOTA, 2017).



Figura 2.2 – Servomotor TowerPro® modelo MG 946R.  
Fonte: TowerPro®.

Servomotores também possuem uma característica específica que os difere dos demais atuadores que é o modo como são acionados e controlados. Isso é feito através da modulação de largura de pulso (PWM — do inglês, *Pulse Width Modulation*). Com isso, o valor angular de rotação do eixo do mecanismo se dará em função da largura do pulso.

O modo como isso é realizado é simples. O sinal é monitorado em intervalos de 20ms pelo circuito de controle do servomotor. Ao serem detectadas variações na largura de pulso, o servomotor é movimentado até atingir a posição referente à largura detectada. No caso de um servo com variação de  $180^\circ$ , a posição  $0^\circ$  (inicial) corresponde a uma largura de pulso de 1ms, enquanto que a posição  $180^\circ$  (final) corresponde a uma largura de pulso de 2ms.

Na Figura 2.3 pode ser visualizada a variação da angulação do servomotor em função da modulação da largura de pulso.

O acesso aos servos é feito por meio de três fios, sendo um referente ao sinal de controle, pelo qual é determinada a posição, e os outros dois referentes a alimentação. Nos servos da TowerPro MG946R o padrão de cores adotado é:

- Vermelho: Alimentação positiva;
- Marrom: GND;
- Laranja: Sinal de controle PWM.

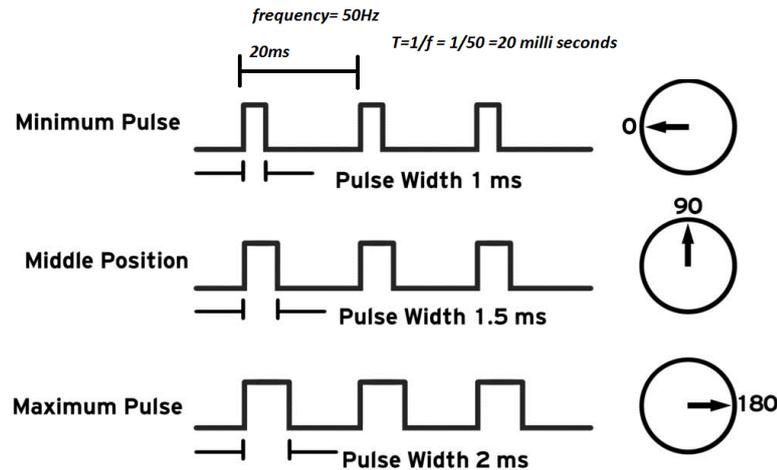


Figura 2.3 – Variação angular do eixo do servomotor conforme a largura de pulso.

O modelo de servomotor TowerPro MG946R possui as seguintes especificações:

- Peso: 55g;
- Dimensão: 40,7 × 19,7 × 42,9mm;
- Torque: 10,5kg/cm (4,8V); 13 kg/cm (6V);
- Velocidade de operação: 0,20s/60° (4,8V) / 0,17s/60° (6V);
- Tensão de operação: 4,8 - 6,6V;
- Temperatura de operação: 0° a 55° celsius;
- Corrente no modo inativo 10mA;
- Tração da corrente operacional sem carga 170mA ;
- Tração da corrente de imobilização 1200mA.

### 2.2.3 Sensor Flexível Resistivo 4.5” SEM-08606

Um sensor é um equipamento que sofre variação no seu comportamento ao ser submetido a ação de alguma grandeza física. Como resposta, pode ou não gerar um sinal pronto para ser utilizado num dispositivo de controle. Quando não, há a necessidade de manipulá-lo antes de ser realizada a leitura pelo sistema de controle. Isso pode ser feito através da implementação de um circuito de condicionamento. Logo, o objetivo fundamental de um sensor é fornecer a um circuito eletrônico informações referentes a variáveis

físicas de interesse que se deseja monitorar em determinado sistema. Então, de acordo com a medição, poderá ser tomara uma ação correspondente (WENDLING, 2010).

Na Figura 2.4 é mostrado o sensor a ser utilizado no presente trabalho. Serão utilizados sensores flexíveis resistivos. Suas características são apresentadas nas seções subsequentes.

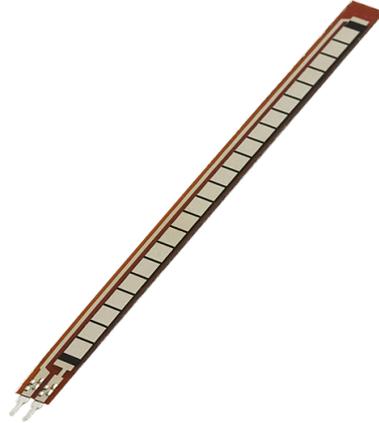


Figura 2.4 – Sensor flexível resistivo 4,5” SEM-08606.  
Fonte: SparkFun Electronics.

### 2.2.3.1 Princípio de funcionamento e fabricação

Sensores flexíveis resistivos (SFRs, daqui em diante) realizam a conversão da alteração de sua curvatura numa variação e resistência elétrica. Entende-se por flexão a movimentação mecânica que gera uma variação na posição física de um corpo que resulta no encurtamento de um ângulo articular. Anatomicamente, uma articulação representa o ponto de junção entre dois (ou mais) ossos, mas de forma geral constitui qualquer ponto que une partes isolados de uma estrutura (SAGGIO; RIILLO et al., 2015).

Os SFRs fundamentam-se basicamente nas características resistivas variáveis de um material condutor, tipicamente em forma de uma tinta, projetado sobre diferentes tipos de substratos. O componente condutor mais normalmente adotado é baseado em elementos de carbono na forma de pó, tinta, partículas, nanotubos, etc. Também podem ser utilizados metais de transição como prata, cobre, níquel, platina e paládio. Conseqüentemente, as propriedades elétricas do sensor dependem diretamente do tipo do material condutor adotado e do modo como ele é depositado. Isto faz com que a resistência do sensor seja altamente sensível a quaisquer defeitos ao longo da superfície condutora (SAGGIO; RIILLO et al., 2015).

Com relação à habilidade flexora do sensor, esta depende principalmente das propriedades do material utilizado como substrato, bem como da qualidade de sua adesão ao material condutor. Este substrato é obtido através de diferentes materiais à base de polímeros como, por exemplo, cloreto de polivinila (PVC), polipropileno, Mylar®, que é um filme de poliéster fino, flexível e forte, resistente ao calor e com excelentes propriedades isolantes, dentre outros (SAGGIO; RIILLO et al., 2015).

### 2.2.3.2 Propriedades e Caracterização Elétrica

As principais características dos SFRs são sensibilidade, repetibilidade e reprodutibilidade das medições, tempo de recuperação, linearidade em resposta e consumo de energia. As principais propriedades mecânicas são peso, flexibilidade, resistência, robustez e confiabilidade. Possui outras características vantajosas como seus recursos de dimensionamento, sua funcionalidade em ambientes adversos, facilidade de remoção ou aplicação e custo-benefício (SAGGIO; RIILLO et al., 2015).

O SFR consiste num um dispositivo passivo que não possui a necessidade de uma fonte geradora de energia para funcionar. O substrato sofre compressão quando o sensor é flexionado, fazendo com que a camada condutora se estique, o que ocasiona o aumento da resistência total do sensor até atingir seu valor máximo que corresponde ao ângulo máximo de deflexão que pode ser medido.

A caracterização da resistência de um SFR pode ser realizada em termos do valor da resistência, em relação ao ângulo de flexão. Isso pode ser realizado de forma prática posicionando o sensor sobre uma série de superfícies que possuem diferentes raios de curvatura (TSAGARAKIS et al., 2006; PONTICELLI; SANTOS, 2008; SAGGIO; LAGATI; ORENCO, 2012).

De modo geral, quanto menor o raio de curvatura, maior será a área condutora e, conseqüentemente, maior será o valor da resistência elétrica do sensor. É importante salientar que a resistência pode variar ao longo do tempo, mesmo que o sensor não esteja sendo utilizado (SIMONE; KAMPER, 2005; KACZMAREK, 2006; ORENCO; SBERNINI et al., 2013).

### 2.2.3.3 Circuito de Condicionamento

É necessário obter sinais úteis dos SFRs para que estes possam ser utilizados de acordo com a aplicação requerida. Para isso são adotados circuitos eletrônicos de condicionamento a fim de obter medições com base no valor de resistência dos sensores. A realização do circuito de condicionamento dos SFRs é feita de forma mais eficiente quando estes possuem maiores amplitudes de variação da resistência e respostas mais lineares.

Uma aplicação amplamente utilizada por diversos autores utiliza o sensor em série com um resistor de resistência fixa, formando assim um divisor de tensão, o que gera uma saída em tensão de acordo com a variação da resistência do sensor, que pode ser relacionada com o ângulo de flexão e que pode ser medida através da queda de tensão na resistência fixa (JURGENS; PATTERSON, 1997; WANG et al., 2011; SAGGIO; BOCCHETTI et al., 2010).

### 2.2.3.4 Medições de Atividade Física

Os SFRs possuem aplicações mais expressivas no ramo de rastreamento de movimentos humanos. Eles permitem realizar medições nos diversos seguimentos do corpo pois sua aplicação é rápida, discreta, de fácil implementação e não restringem a movimentação. Além disso, possuem custo relativamente baixo e podem operar por grandes períodos de tempo contínuo com baixo consumo energético (ORENGO; SAGGIO et al., 2010).

A ideia de rastrear os movimentos corporais surgiu inicialmente voltada para aplicações clínicas como um método de avaliar, por exemplo, a atividade física, as articulações humanas e a postura corporal. Para isso, foram usualmente implementados em vestimentas de elástico a fim de permitir a liberdade de movimento e melhores resultados na medição (ZHOU; HU, 2008).

Uma abordagem para a medição da flexão ou extensão dos dedos consiste em posicionar os SFRs individualmente no dorso de cada um dos dedos. Gentner e Classen (2009) propõem um mecanismo de medição através da inserção dos sensores numa espécie de bainha para envolver os sensores, fabricada em Lycra®, que permita a livre flexão e extensão dos sensores e posteriormente costurar esses invólucros na parte dorsal dos dedos de uma luva.

### 2.2.4 Rede de Computadores

Segundo (TANENBAUM, 2003) as redes de computadores são uma coleção de computadores e/ou outros dispositivos autônomos interconectados por uma única tecnologia com o objetivo de compartilhar recursos e trocar informações. Pode-se citar como exemplo a internet, a qual segundo (FRANCISCATTO; CRISTO; PERLIN, 2014), caracteriza-se por uma rede de computadores descentralizada envolvendo meios de comunicação diferentes, e permitindo aos seus usuários a troca constante de informações.

A transmissão de dados na rede de computadores como diz (TORRES, 2001), pode ser de três tipos: *simplex* que é unidirecional, ou seja, há um dispositivo transmissor e outro receptor, não podendo inverter as funções; *half-duplex* do tipo bidirecional, ambos dispositivos podem transmitir e receber dados, porém cada tarefa em tempos diferentes; e a *full-duplex*, semelhante a anterior, porém permitindo a transmissão e recepção de dados ao mesmo tempo.

Existem diversos tipos de redes de computadores, podendo ser classificadas pela área geográfica que cobrem, pela topologia ou pelo tipo de encaminhamento da comunicação e pela maneira como os dados são transmitidos (GALLO; HANCOCK, 2003). Neste trabalho será abordado a do tipo cliente-servidor (comunicação).

Para (FRANCISCATTO; CRISTO; PERLIN, 2014) a rede do tipo cliente-servidor é constituída por um ou mais servidores que promovem serviços de rede aos clientes (“nós”, computadores *desktops*, outros dispositivos) conectados ao mesmo. A justificativa do nome se dá pelo fato de cada cliente solicitar acesso ao servidor de rede quando deseja algum tipo de serviço, como aplicações locais.

Como características principais deste tipo de rede, pode-se dizer que o servidor geralmente é um computador projetado para suportar a execução de várias tarefas, e o cliente um computador que não possui características (quanto a *hardware*) capaz de realizar o trabalho de um servidor, além da rede apresentar uma estrutura de segurança reforçada, uma vez que as informações se encontram centralizadas no servidor, facilitando o controle e gerenciamento dos dados (FRANCISCATTO; CRISTO; PERLIN, 2014). A Figura 2.5 ilustra um exemplo de rede cliente-servidor.

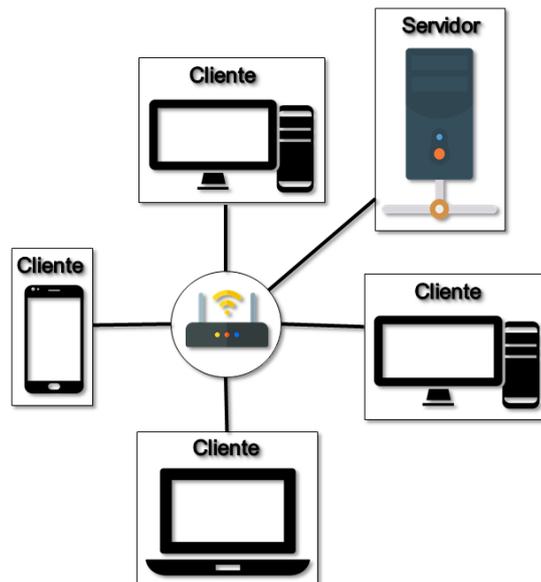


Figura 2.5 – Rede cliente-servidor.

### 2.2.5 Protocolos de Rede

Para (PALMA; PRATES, 2000), protocolo de rede é um conjunto de regras e convenções utilizadas pelos computadores e dispositivos de uma rede para definirem uma comunicação entre eles. Semelhante à linguagem falada, em que duas pessoas se comunicam apenas se falarem o mesmo idioma, os computadores também só estabelecem uma comunicação se utilizarem o mesmo protocolo.

A Figura 2.6 exemplifica o funcionamento de um protocolo de rede.

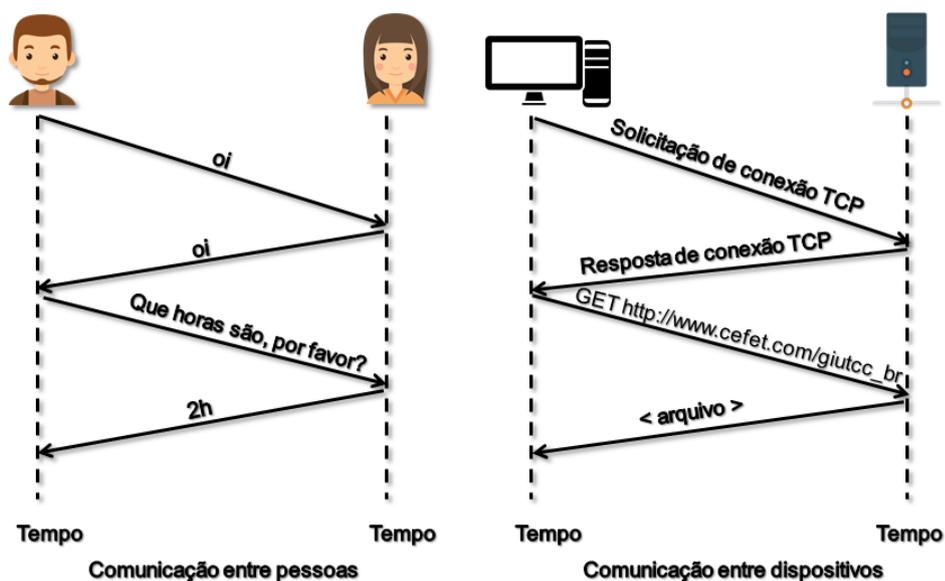


Figura 2.6 – Funcionamento Protocolo de Rede.

Uma rede pode conter protocolos diversos, como o TCP/IP, NetBEUI e o SPX, mas um dos mais conhecidos de rede e da própria Internet é o protocolo TCP/IP (TORRES, 2001).

### **TCP/IP**

Conforme (PALMA; PRATES, 2000), o protocolo TCP/IP é na verdade um conjunto de protocolos, TCP (Protocolo de Controle de Transmissão) e IP (Protocolo da Internet) são os dois mais utilizados e conhecidos da família, justificando o nome para definir todo o conjunto. Tal protocolo permite a conexão de computadores tanto em pequenas redes locais (LAN), quanto em redes corporativas interligando diversos países (WAN). Um de seus objetivos é estabelecer um padrão de transmissão de dados para que computadores de fabricantes distintos se comuniquem.

Os protocolos normalmente são arquitetados em camadas, em que cada um trata de um aspecto específico da comunicação, e o conjunto de protocolos para a Internet geralmente consiste em quatro camadas principais seguindo o modelo DARPA para TCP/IP conforme a Figura 2.7 (PALMA; PRATES, 2000).



Figura 2.7 – Arquitetura do Protocolo TCP/IP (PALMA; PRATES, 2000).

Para (KRISHNAMURTHY; REXFORD, 2001) a camada de aplicação trabalha nos detalhes das aplicações específicas, fazendo comunicação com a camada de transporte por meio de portas. Na prática, um protocolo desta camada é implementado como parte de um *software* de aplicação, como um *browser* da *Web* ou um servidor *Web*.

A camada de transporte pega os dados enviados pela camada de aplicação e os transforma em pacotes, a serem enviados para a camada de rede, podendo ou não implementar algum mecanismo de controle para garantir a entrega de informações. E é nesta camada que o protocolo TCP está inserido (TORRES, 2001).

O protocolo TCP é responsável pela entrega dos pacotes, garantindo de fato a entrega e integridade dos dados, baseando seu funcionamento na conexão lógica entre dois computadores. O TCP é utilizado na transmissão de dados críticos, em que falhas não são aceitáveis, por isso, quando uma informação é transmitida, mecanismos de verificação de erros e controle de fluxo garantem o correto recebimento da informação. Para transmitir os dados, o protocolo TCP é dividido em segmentos menores – numerados – e enviados ao destino. Cada segmento é verificado por um “*checksum*” para evitar que os mesmos sejam corrompidos durante a transmissão devido a erros ou interferências do meio físico (PALMA; PRATES, 2000).

Uma vez definido o conceito e responsabilidades do protocolo TCP, é importante conceituar o protocolo (Protocolo de Datagrama do Usuário) que também pertence à camada de transporte. Conforme (PALMA; PRATES, 2000; TORRES, 2001) o UDP é um serviço de entrega de *datagramas* sem conexão, isto é, ao contrário do TCP, ele não verifica se o pacote de dados chegou ou não ao seu destino, nem sua integridade, deixando a transmissão de dados mais rápida. E por essas razões de não confiabilidade, esse protocolo não é utilizado para o transporte de dados importantes, como arquivos e *e-mails*, mas sim em aplicações em que a velocidade de transmissão é mais importante, como envio de mensagens DNS (Sistema de Nomes e Domínios), sinais de voz e vídeo.

Ainda segundo (PALMA; PRATES, 2000) a camada de rede define o mecanismo utilizado para que o computador de origem localize o computador de destino, definindo a rota que as mensagens deverão percorrer. Na transmissão de um dado de programa, o pacote de dados recebido da camada de transporte é dividido em pacotes (*datagramas*), os quais são enviados para a camada de interface com a rede. O protocolo IP reside nesta camada, e o mesmo não verifica se os *datagramas* chegaram ao destino, apenas os endereça.

Como membro da camada de rede, o protocolo IP dito anteriormente, pega os dados enviados pela camada de transporte, e os envia para uma camada física, e sua principal função é o roteamento, ou seja, adicionar mecanismos para que os *datagramas* cheguem o mais rápido possível ao seu destino, com auxílio de roteadores de rede (TORRES, 2001).

Já a camada de interface de rede, por (PALMA; PRATES, 2000), define os padrões de transmissão de informações através do meio físico, tratando dos detalhes de *hardware* de interação. Os *datagramas* recebidos da camada de rede são subdivididos em *frames* e

convertidos em sinais (ópticos, elétricos, entre outros) para serem inseridos no meio físico de acordo com o tipo de rede.

### 2.2.6 Servidor *Web*

O servidor Web é também conhecido como servidor de hospedagem, o qual armazena as páginas dos usuários que ficarão disponíveis na Internet para acesso pelos clientes via *browsers* (GALLO; HANCOCK, 2003). É importante ressaltar que geralmente um servidor Web está ligado a outros serviços de servidor como banco de dados, de aplicações *server-side*, entre outros. Ou seja, o servidor Web é um programa que gera e transmite respostas aos pedidos de cliente para recursos da Web (KRISHNAMURTHY; REXFORD, 2001).

Ainda de acordo com (KRISHNAMURTHY; REXFORD, 2001), este servidor é executado em uma plataforma de suporte que é um computador com acesso à rede, o qual é constituído por um ou mais processadores com memória e talvez um disco para armazenar documentos estáticos e *scripts*. O servidor Web interage com o processador, disco e a conexão de rede por meio do sistema operacional de suporte.

#### ***GlassFish***

O *GlassFish* é um servidor de aplicação Java EE (*Enterprise Edition*) desenvolvido pela Sun Microsystems para o desenvolvimento e execução de aplicações e serviços Web, oferecendo desempenho, confiabilidade, produtividade e facilidade. É um servidor de aplicação de código aberto (*open source*) disponível gratuitamente e licenciado pela *Common Development and Distribution License* (CDDL). Tal servidor fornece toda uma infraestrutura de serviços como por exemplo, a criação de *pool* de conexões ao banco de dados e ao *deploy* de várias aplicações no mesmo servidor, além de fornecer suporte para a criação e administração de *realms* (repositório de usuários e grupos que possui mecanismos para identificar usuários válidos para uma aplicação) (LUVIZON, 2012).

Ainda segundo (LUVIZON, 2012) o *GlassFish* foi o primeiro servidor de aplicação a dar suporte total a especificação Java EE. Conta com a adição de características como alta disponibilidade, escalabilidade e tolerância a falhas, que são fundamentais para um servidor que hospede aplicações de médio e grande porte.

Segundo (SANTOS GOMES, 2011), o Glassfish é o mais rápido servidor de aplicativos *open source* que oferece recursos avançados como controle de versão de aplicativos, recursos

de escopo, e integração com as ferramentas de desenvolvimento NetBeans, Eclipse e outros. Portanto, seus defensores afirmam que é o mais produtivo, uma vez que o mesmo consegue ter as funcionalidades do *Jboss* e um tempo de inicialização comparável a um *Tomcat*, além de uma excelente integração com IDE's como o NetBeans, que tem uma parte de seu ambiente de integração no modo visual.

### 2.2.7 Banco de Dados

Os bancos de dados são coleções de informações conexas, um “armário” de arquivamento eletrônico utilizado por organizações por meio de aplicações, já o SGBD (Sistemas de Gerenciamento de Banco de Dados) é o *software* que trata o acesso ao banco de dados. Portanto, o sistema de banco de dados é nada mais que um sistema computadorizado de manutenção de registros, em que usuários o solicita a realizar diversas funções envolvendo arquivos, como por exemplo: acrescentar, inserir, buscar, excluir, alterar ou remover esses arquivos. Desta maneira o sistema envolve quatro componentes principais dados, hardware, software e usuário (DATE, 2004).

A Figura 2.8 mostra a configuração do sistema de banco de dados.

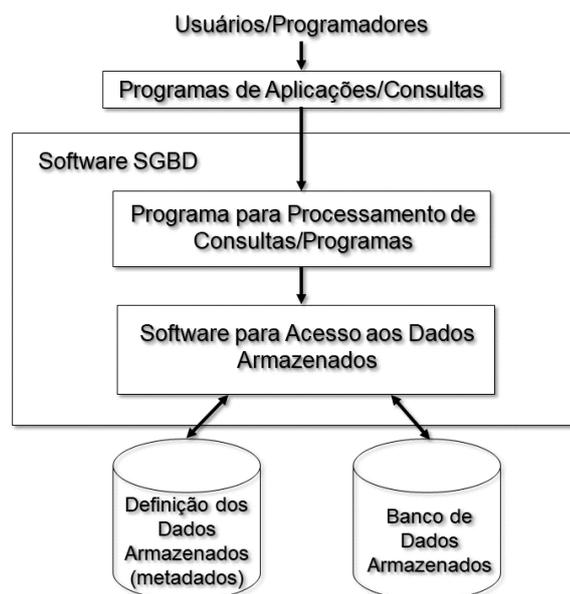


Figura 2.8 – Sistema Banco de Dados (COOPERATI, 2019).

Além do sistema de banco de dados definir estruturas de armazenamento e fornecer mecanismos para manipulação de informações, ele precisa garantir a segurança das mesmas, apesar das falhas de sistema ou de tentativas de acesso não autorizado (SILBERSCHATZ; KORTH; SUDARSHAN, 2006).

Conforme (DATE, 2004), há diversas vantagens em se usar o sistema de banco de dados, pois o mesmo proporciona às empresas o controle centralizado de seus dados, o que significa que elas podem compartilhá-los, redundância de informações pode ser reduzida, algumas inconsistências podem ser evitadas, o suporte a transações pode ser fornecido, a segurança reforçada, integridade mantida, e padrões podem ser impostos. Não o bastante, o SGBD tem outra vantagem como um objetivo, a independência de dados.

A independência de dados define-se como a imunidade das aplicações a alterações no modo de armazenar fisicamente os dados e obter acesso a eles, o que significa que as aplicações do processo não dependem de qualquer representação física ou técnica de acesso específica (DATE, 2004).

### ***MySQL***

*MySQL* é um SGBD popular entre os bancos de dados com código-fonte aberto empregado em aplicações para Internet, cuja linguagem é a padrão SQL (Structured Query Language). O mesmo se torna uma alternativa atrativa uma vez que seu custo é muito baixo, destaca-se com suas características de velocidade, escalabilidade e confiabilidade, além de apresentar algumas vantagens como número ilimitado de utilização por usuários simultâneos, capacidade de manipulação de tabelas com mais de 50 milhões de registros, alta velocidade de execução de comandos, controle fácil e eficiente de privilégio de usuários (NIEDERAUER; PRATES, 2006).

#### **2.2.8 ESP32**

O ESP32 é um dispositivo IoT (Internet das Coisas) que consiste de um microprocessador de baixa potência dual core em arquitetura Tensilica Xtensa 32-bit LX6. Essa arquitetura permite que ele possa ser programado de forma independente, sem a necessidade de outras placas microcontroladoras. Possui memória SRAM de 520 KB e memória flash de 16MB.

Possui também suporte embutido à rede WiFi e Bluetooth v4.2, tensão operacional de 2,3V à 3,6V, conector externo antena IPEX/PCB, cristal oscilador 32KHZ e criptografia com chave RSA de 4096 bits, ou seja, flexibilidade operacional e maior segurança na construção de sistemas automatizados.

O ESP32 possui 18 canais de entrada. Os canais de entrada ADC têm uma resolução de 12 bits. Isso significa que pode-se obter leituras analógicas que variam de 0 a 4095,

nas quais 0 corresponde a 0V e 4095 a 3,3V. Também possível definir a resolução de seus canais.

O controlador ESP32 LED PWM possui 16 canais independentes que podem ser configurados para gerar sinais PWM com propriedades diferentes. Todos os pinos que podem atuar como saídas podem ser usados como pinos PWM.

Dentre as principais características deste dispositivo, podemos citar: baixo consumo de energia, alto desempenho de potência, amplificador de baixo ruído, robustez, versatilidade e confiabilidade.

A Figura 2.9 mostra um ESP32 e destaca alguns elementos básicos de sua estrutura.

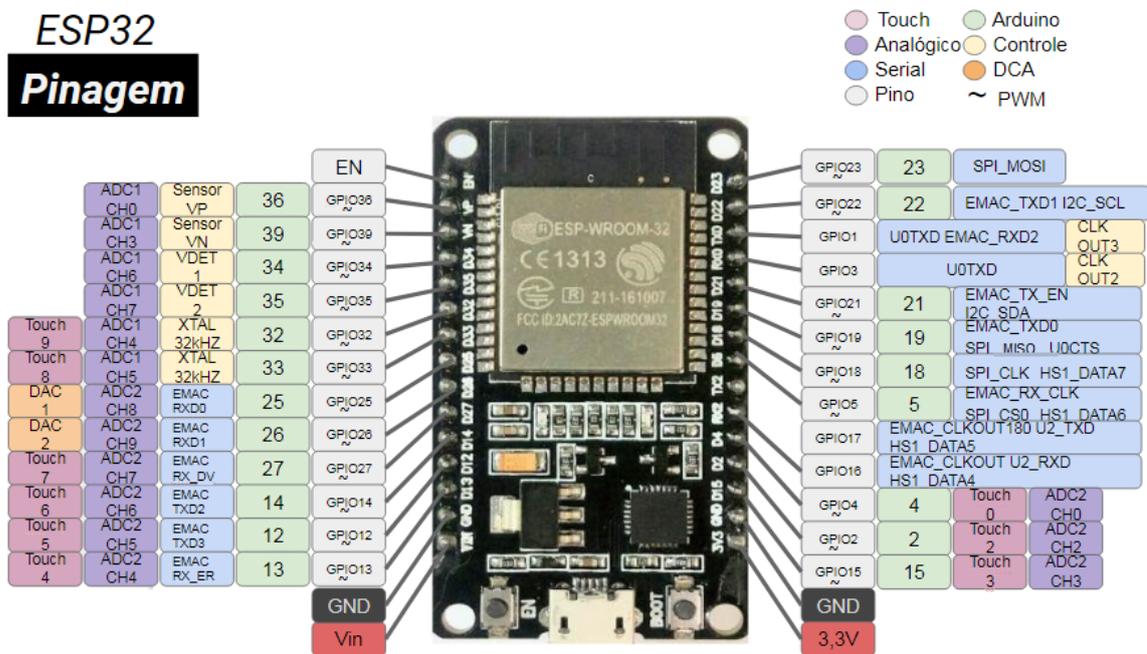


Figura 2.9 – Estrutura do ESP32.



# Capítulo 3

## Metodologia

Esta etapa do trabalho apresenta os procedimentos adotados para o desenvolvimento do dispositivo a partir dos objetivos determinados. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma que ilustra a sequência de ações que compõem o modo de funcionamento do dispositivo.

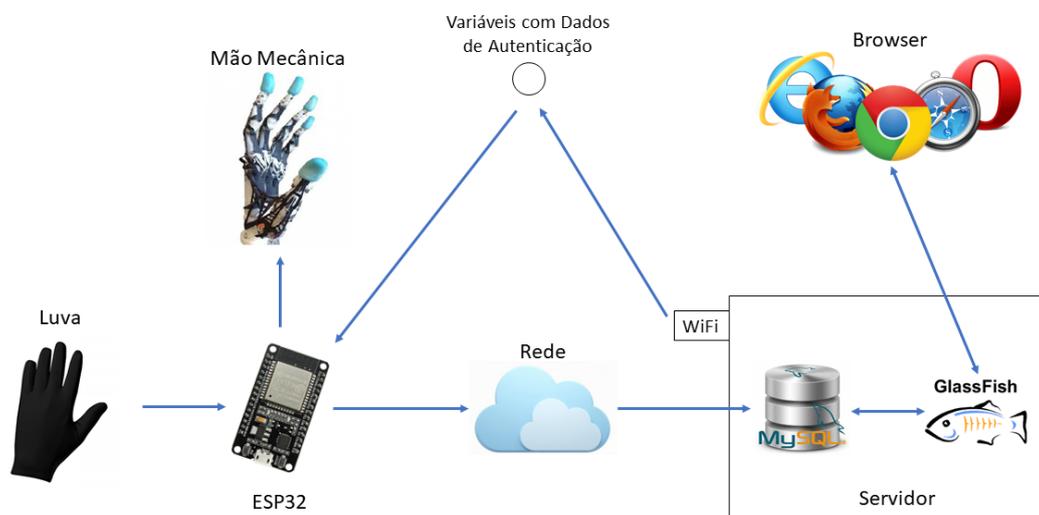


Figura 3.1 – Diagrama de funcionamento do dispositivo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como mostrado no diagrama, o conceito do trabalho gira em torno da ideia de acionar remotamente uma mão artificial através dos movimentos de uma mão humana. Para isso é necessário desenvolver as partes que, integradas, permitirão a conclusão do protótipo.

Na Tabela 3.1 são listados os materiais utilizados para a construção do trabalho. A seguir são descritos os métodos utilizados para realizar as etapas presentes no fluxograma.

Tabela 3.1 – Materiais e Componentes

Quantidade	Componente ou Ferramenta	Preço (R\$)
5	Sensores	61,50 un.
5	Servomotores	13,80 un.
1	ESP32	40,00
5	Resistores 22k $\Omega$	1,50
15	Jumpers	22,35
1	PCB	7,20
1	Impressão 3D (mão e antebraço)	120,00
1	Luva	15,00
1	Parafuso	5,00
1	Cola	10,00
5 metros	Linha de peixe trançada	5,00
TOTAL		602,55

## 3.1 Implementação Eletrônica

### 3.1.1 Luva sensorizada (medição do movimento)

Iniciou-se a etapa de construção da luva sensorizada com um teste para obtenção dos valores de resistências dos sensores de acordo com a variação de seu raio de curvatura. Neste teste os sensores foram posicionados sobre uma folha na qual imprimiu-se semi-circunferências que variavam entre 3 cm e 15 cm de raio e foram obtidas as resistências respectivas a cada medição. A Figura 3.2 mostra um exemplo de como foram realizadas essas medições.

Posteriormente procedeu-se de fato com a construção de uma luva sensorizada para realizar a coleta de dados referentes aos movimentos da mão do usuário. A luva adotada é de material confortável e com elasticidade suficiente para permitir a livre movimentação dos dedos sem qualquer restrição. À luva foram acoplados os SFRs que realizam a coleta das informações de flexão e extensão dos dedos.

Os SFRs, quando posicionados em articulações do corpo humano, fornecem medidas dos movimentos realizados por tais articulações. Essas medidas podem ser obtidas através

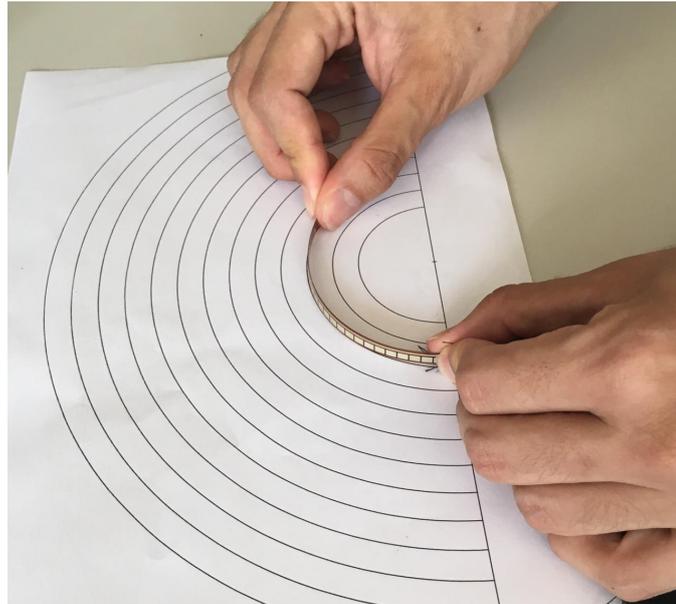


Figura 3.2 – Procedimento de medição da variação de resistência dos sensores.

da variação de resistência sofrida pelo sensor. Com isso, pode-se utilizar os SFRs para medir os movimentos dos dedos da mão humana. Para tal, os sensores foram incorporados à luva.

Primeiramente foi feito um pequeno furo na extremidade final de cada sensor, após o término do material resistivo. É importante atentar que a perfuração foi realizada fora da faixa de variação da resistência dos sensores. Em seguida uma pessoa vestiu a luva e os sensores foram posicionados onde se desejava acoplá-los. Com os sensores devidamente posicionados, foram feitas marcações a lápis para identificar os locais das articulações dos dedos. Então, com a luva fora da mão, costurou-se os sensores na luva próximo à região das unhas através do furo que foi previamente realizado em sua extremidade.

Os sensores foram posicionados ao longo do comprimento dos dedos da luva e foram feitas costuras em laços nas posições das articulações dos dedos para fixar os sensores na luva e, ao mesmo tempo, permitir que esses pudessem deslizar dentro dos laços quando os dedos se movimentassem. A outra extremidade dos sensores, por onde serão realizadas as conexões ao circuito eletrônico, permaneceu livre sem ser costurada.

### 3.1.2 Circuito eletrônico dos sensores

Para o tratamento dos dados coletados pelos sensores utilizou-se a plataforma IDE do Arduino. Para que fosse possível realizar a comunicação entre os sensores e o ESP32 fez-se necessária a realização de um circuito eletrônico de condicionamento para obter

uma medição compatível de leitura. Neste caso foi utilizado um divisor de tensão.

Os sensores flexíveis são resistências variáveis e ao serem conectados em série com resistências fixas (invariantes) permitem que a mudança ocorrida na resistência dos sensores (através da flexão) possa ser detectada devido à queda de tensão sobre as resistências fixas. Este diferencial de tensão pode ser medido pelas entradas analógicas do ESP32. As resistências fixas utilizadas para o circuito divisor de tensão foram de  $22k\Omega$ . Para efetuar as conexões entre os componentes eletrônicos foram necessários *jumpers*. As cores das conexões seguiram um padrão definido como: vermelho para tensão positiva, preto para GND e azul para sinal.

Os fios vermelhos dos sensores foram conectados a um único fio comum que foi ligado no +3.3V do ESP32. O mesmo aconteceu com os fios pretos dos sensores, que foram ligados ao GND do ESP32 por meio de um fio em comum. Os fios azuis conectados entre os sensores e os resistores fixos, referentes ao sinal de medição, foram ligados cada um em um pino de entrada analógica do ESP32. O circuito foi feito utilizando-se de uma *protoboard* para conexões.

A Figura 3.3 ilustra as conexões dos sensores e resistores com o ESP32.

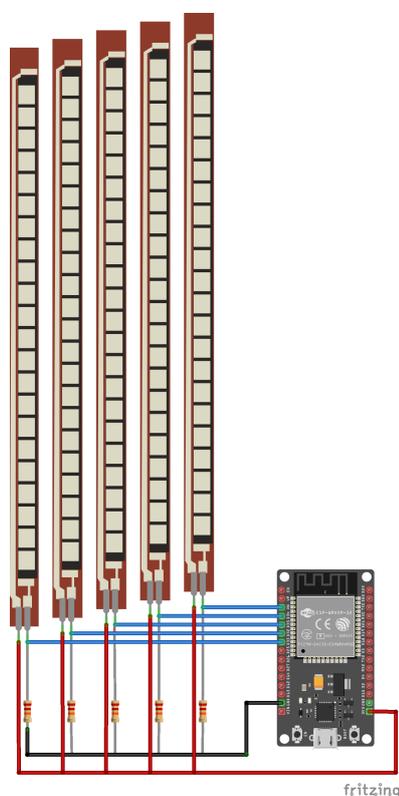


Figura 3.3 – Circuito eletrônico para aquisição de dados dos sensores pelo ESP32.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

## 3.2 Tratamento de dados no ESP32

O ESP32 possui um conversor A/D (analógico/digital) integrado, que utiliza para converter sinais de entrada analógicos em sinais digitais. Para esta aplicação foram utilizados os pinos de saída de sinal digital PWM, os quais ficaram a cargo do acionamento dos servomotores.

A posição dos servomotores é controlada por meio do *duty cycle* do sinal PWM, contudo, a biblioteca `servo.h` que foi utilizada não exige que os pinos de controle possuíssem PWM. A utilização dessa biblioteca se deu devido ao fato de o comando `analogWrite` produzir um controle menos preciso e também oferecer risco de danificar os servos em virtude da sua frequência de 490Hz (10 vezes maior que a frequência típica de controle de servomotores). A utilização da biblioteca `servo.h` também torna a aplicação mais precisa e faz com que o uso do servomotor seja mais simples pelo fato de não se precisar trabalhar com valores de PWM (0 a 4095), sendo necessário somente definir o ângulo desejado.

## 3.3 Sistema de acionamento e estruturas mecânicas

O sistema eletromecânico do qual trata este trabalho é acionado por dispositivos denominados servomotores. Esses são acionados e controlados através do ESP32 por meio de um sinal PWM, onde a largura do pulso determina o ângulo que o eixo do servomotor deve ser rotacionado. A variação angular dos servos foi determinada durante os testes onde foi definida uma rotação máxima, que correspondia aos dedos completamente flexionados, e uma rotação mínima, que correspondia aos dedos totalmente estendidos. Na Figura 3.4 é apresentado o circuito de conexões para o acionamento dos servomotores utilizando o ESP32. A alimentação dos servos foi feita via fonte regulada em 6,5V.

Com relação a anatomia da mão, Ingram et al. (2008) afirmam que 40% da capacidade funcional total da mão é desenvolvida pelo polegar, configurando este como o principal dedo da mão e, portanto, merecedor de atenção especial. Por isso é importante salientar que a posição deste dedo na estrutura do protótipo artificial é um ponto crucial para garantir o maior número de combinações de maneiras possíveis para manipular e pegar objetos.

Há diversos modelos propostos por diferentes autores para uma estrutura representativa da mão humana e de suas funções. Duas destas estruturas se destacam. A primeira

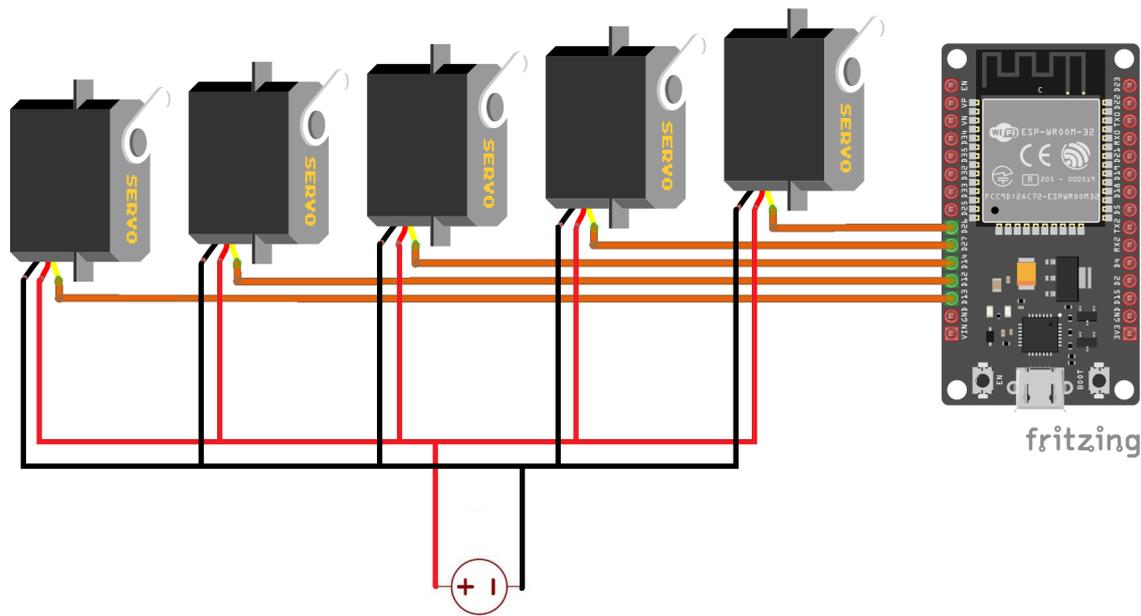


Figura 3.4 – Circuito de acionamento dos servomotores no ESP32.

Fonte: Elaborada pelo autor.

foi proposta pela *Open Bionics* e denominada Ada, que segundo o site do desenvolvedor é uma mão robótica totalmente imprimível em impressora 3D. Ela possui um design completamente aberto e gratuito para livre utilização. Foi proposta para ser uma plataforma para interessados em desenvolver pesquisas em robótica e também para projetos de próteses para deficientes físicos. Na Figura 3.5 é mostrada a estrutura da mão robótica Ada.

O segundo modelo de mão robótica em destaque foi o proposto por Gael Langevin, que faz parte de seu projeto pessoal denominado InMoov. Foi iniciado em 2012, sendo o primeiro robô em tamanho real impresso em código aberto 3D. Na Figura 3.6 é apresentado o modelo da mão robótica da InMoov.

A partir da análise destes dois modelos, optou-se por adotar o proposto por Langevin, do projeto InMoov. Essa escolha se deu em virtude de algumas características específicas deste modelo. Primeiramente, o material de impressão do modelo da Open Bionics é um filamento flexível que possui um custo mais elevado em relação ao ABS tornando o menos acessível. Em segundo lugar, o modelo da InMoov possui um maior número de articulações, isso faz com que os movimentos executados por ele sejam mais semelhantes aos de uma mão humana.

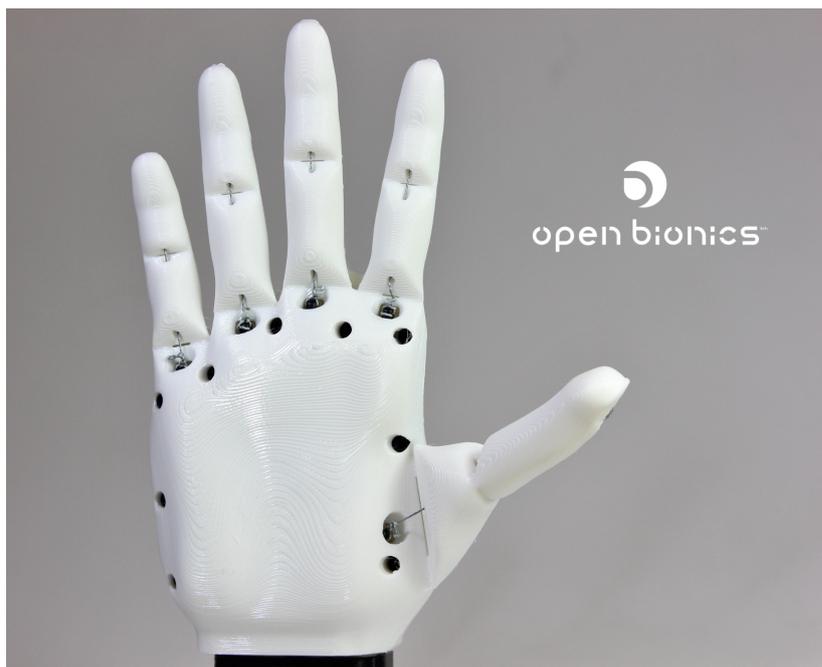


Figura 3.5 – Mão robótica Ada, da Open Bionics.  
Fonte: Open Bionics.

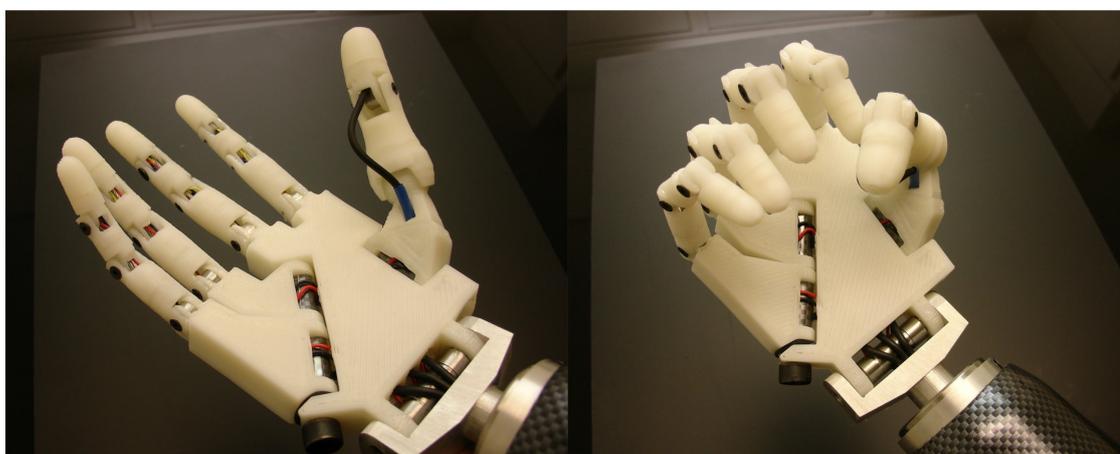


Figura 3.6 – Mão robótica do projeto InMoov.  
Fonte: (LANGEVIN, 2012).

O projeto da mão robótica da InMoov possui 16 DOFs (do inglês *degrees of freedom*), 14 para falanges e 2 para palma da mão. Isso agrega ao modelo maior eficiência aos realizar movimentos como pressões palmares. O material escolhido para a confecção da estrutura da mão mecânica será o ABS devido a suas características já apresentadas anteriormente e também por ser mais acessível. Na Figura 3.7 é mostrado o desenho 3D do modelo de mão da InMoov onde é possível visualizar seus 16 DOFs.

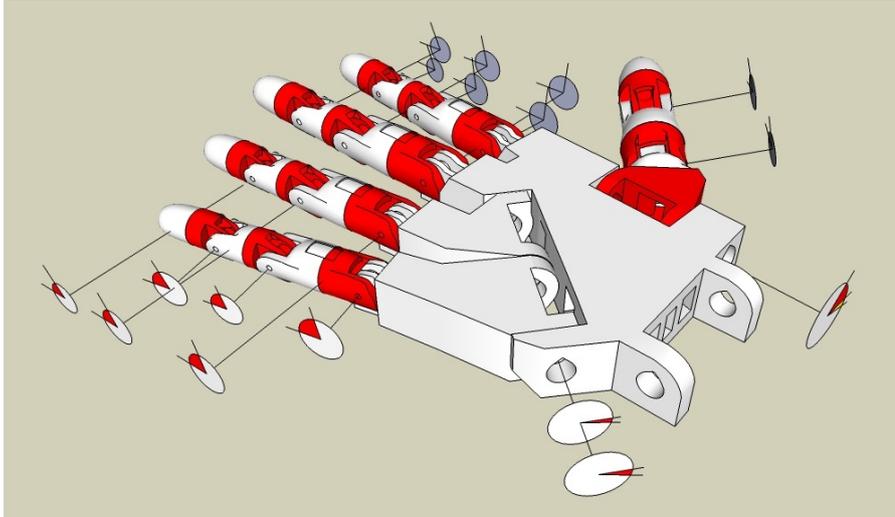


Figura 3.7 – Modelo representativo da mão InMoov destacando os 16 DOFs.  
Fonte: (LANGEVIN, 2012).

O projeto também conta com uma estrutura referente ao antebraço. Esta também foi construída a fim de dar suporte ao sistema, acoplar os servomotores e abrigar os cabos de conexão, dando ao sistema uma aparência mais organizada. Na Figura 3.8 pode ser observada a estrutura do antebraço e os suportes para acoplamento dos servomotores.

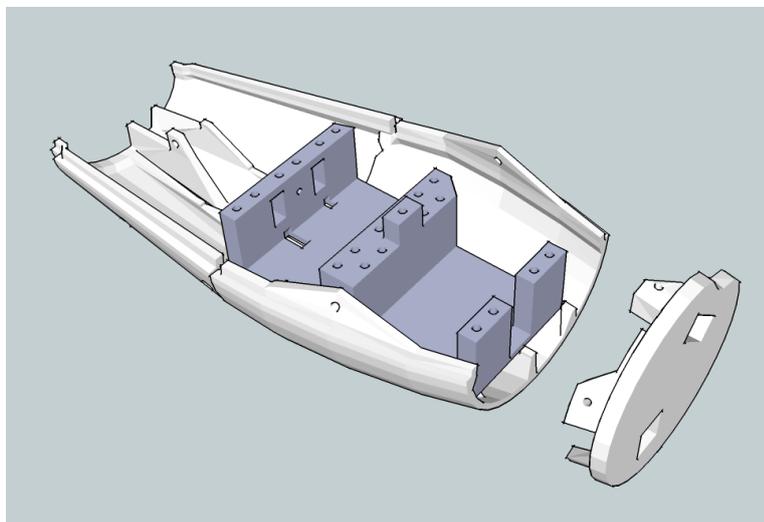


Figura 3.8 – Estrutura do antebraço para acoplamento dos servomotores.  
Fonte: (LANGEVIN, 2012).

A comunicação entre os servomotores e os dedos foi realizada por meio de tendões feitos de linha de pesca trançada. Uma das extremidades dos fios foi conectada na ponta dos dedos, passando por canais internos nos dedos e na palma da mão. Na Figura 3.9 pode ser observada a estrutura de um dos dedos que compõem a mão mecânica, os demais

dedos possuem estrutura similar. Já a Figura 3.10, mostra os canais internos na palma da mão por onde passam os tendões.

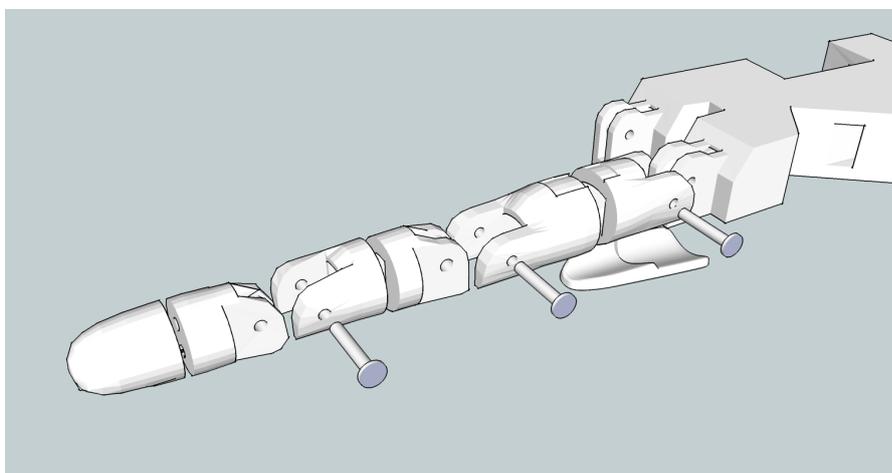


Figura 3.9 – Estrutura dos dedos da mão mecânica.  
Fonte: (LANGEVIN, 2012).

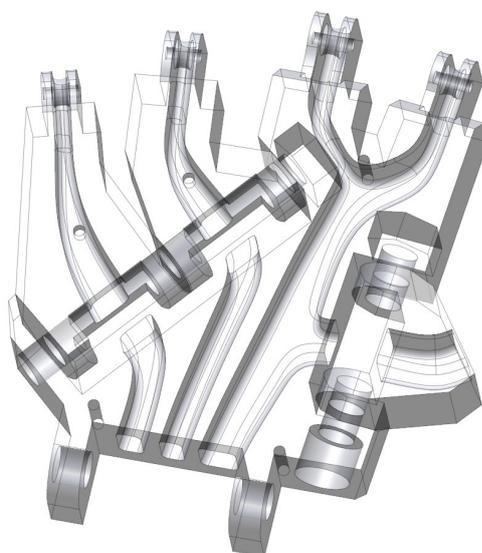


Figura 3.10 – Canais internos da palma da mão para passagem dos tendões.  
Fonte: (LANGEVIN, 2012).

A outra extremidade dos fios foi conectada a polias que fixadas junto aos eixos dos servomotores. Essas polias tem por finalidade aumentar o efeito de giro dos servomotores durante a execução de movimentos de extensão e flexão dos dedos. Exemplificando tem-se que, para uma mesma variação angular do eixo do servomotor com polias de diferentes raios, quanto maior for o raio da polia, maior será a variação de posição dos dedos pois o tendão sofrerá uma maior movimentação, já que este é puxado em torno do comprimento

da circunferência da polia. Na Figura 3.11 é mostrado o esquema de polias acopladas aos eixos dos servomotores.

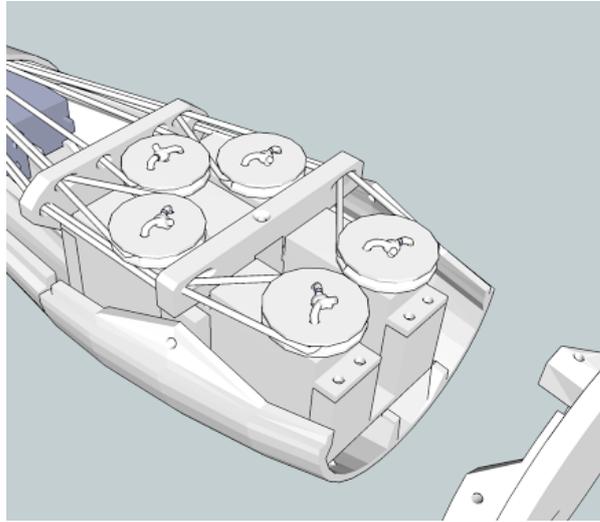


Figura 3.11 – Conjunto de polias que realizam a manipulação dos tendões.  
Fonte: (LANGEVIN, 2012).

Após a realização das conexões de todos os tendões de manipulação dos dedos, foram realizados os testes para verificar a liberdade dos tendões para se movimentarem. Posteriormente prosseguiu-se com a calibração dos servomotores para definição do alcance de variação angular destes.

### 3.4 Aplicação *Web*

Esta etapa consiste em realizar a implementação do dispositivo conforme prevê seu diagrama de caso de uso, incorporando a ele a modelagem do banco de dados e as telas de interface da aplicação *Web*.

Para demonstrar o sistema de acionamento da mão artificial utiliza-se diagramas de caso de uso - do ponto de vista do usuário - com UML (Linguagem de Modelagem Unificada), que é uma linguagem adequada utilizada para ilustrar o funcionamento de sistemas e sua interação usuários, é comumente utilizada por desenvolvedores de *softwares*. Diagramas de casos de uso geralmente são constituídos por quatro partes: cenário, eventos que acontecem quando o usuário interage com o sistema; ator, tipo de usuário do sistema; caso de uso, tarefa a ser realizada pelo usuário; comunicação, o que dirige um ator a um caso de uso (BOOCH; JACOBSON; RUMBAUGH, 2006).



Figura 3.12 – Notação de diagrama de caso de uso.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas relações entre casos de uso há também os conceitos de *include* e *extend*. Estes são representados dentro de “< >” e indicados por setas tracejadas. O *Include* é uma relação onde existe a obrigação da execução de um caso de uso prévio à realização de outro. Já o *extend* possui sentido contrário pois permite que se realize a execução de um caso de uso sem que seja necessário a execução de um antecedente (BOOCH; JACOBSON; RUMBAUGH, 2006).

A Figura 3.13 representa o sistema de acionamento do protótipo. Nela pode ser visto que o ator é o usuário que realiza o *Login* dentro da aplicação *Web*. Esta verifica o *Login* e a senha e permite, ou não, o acesso ao dispositivo, bem como permite visualizar dados referentes à atuação do dispositivo. A aplicação também fornece dados de registro de *Logins* realizados.

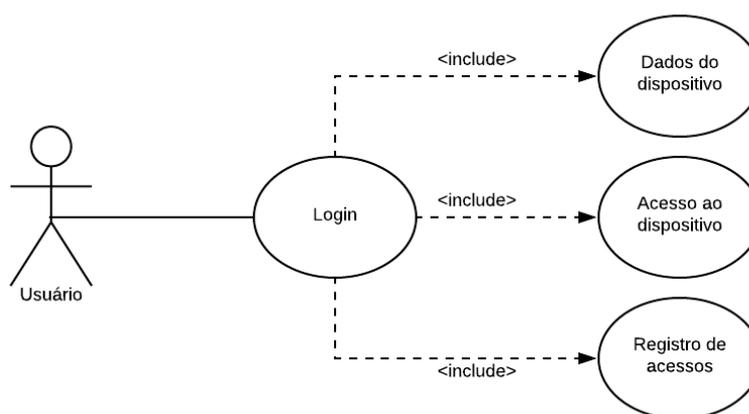


Figura 3.13 – Diagrama de caso de uso do dispositivo.  
Fonte: Elaborada pelo autor.



## Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos.

### 4.1 Sensores

Antes de realizar a aplicação dos sensores à luva foram realizados testes com os SFRs a fim de obter uma melhor compreensão acerca do modo de funcionamento destes.

O gráfico apresentado na Figura 4.1 mostra a curva de variação da resistência sofrida pelos sensores em relação à variação de seus raios de curvatura. Nela pode-se observar um comportamento não linear, contrariando o fato de que o sensor é linear. Foi então que pensou-se em outra abordagem, verificar qual arco o sensor representava quando posicionado sobre cada uma das circunferências, este resultado é mostrado na Figura 4.2.

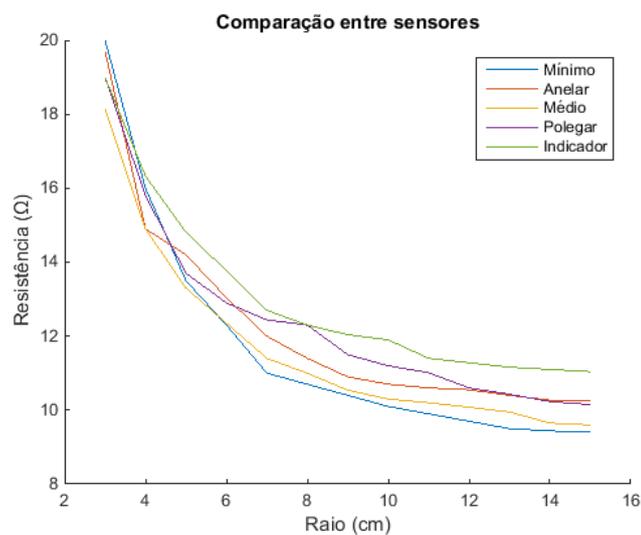


Figura 4.1 – Curva de variação dos sensores.

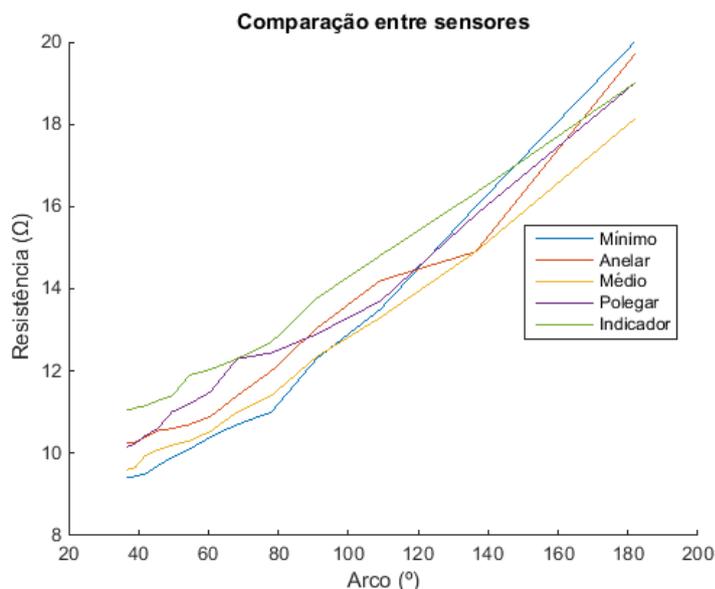


Figura 4.2 – Curva de variação dos sensores.

Pode-se observar na Figura 4.2 que o comportamento é linear, mostrando que esta é a forma correta de se caracterizar os sensores de flexão, fazendo a relação da variação da resistência pela variação do arco de circunferência produzido pelo sensor. Também é possível visualizar que os sensores, apesar de possuírem valores de resistência muito próximos, não são iguais.

As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram os valores de cada medição tanto no processo de extensão quanto de flexão. Os sensores estão descritos como: Polegar (S22), Indicador (S27), Dedo Médio (S20), Anelar (S18) e Dedo Mínimo (S5).

Tabela 4.1 – Medições dos Sensores - Procedimento de Extensão

Variação da resistência na Extensão							
Raio (cm)	Arco (graus)	S5 (Ω)	S18 (Ω)	S20 (Ω)	S22 (Ω)	S27 (Ω)	Média (Ω)
3	181.9141	20	19.7	18.13	19	19	19,16
4	136.4356	16	14.9	14.9	15.8	16.33	15,58
5	109.1485	13.5	14.2	13.3	13.7	14.81	13,9
6	90.9570	12.3	13.04	12.35	12.9	13.77	12,87
7	77.9632	11	12	11.4	12.44	12.7	11,9
8	68.2178	10.7	11.4	11	12.3	12.3	11,54
9	60.6380	10.4	10.9	10.54	11.5	12.04	11,06
10	54.5742	10.1	10.7	10.3	11.2	11.9	10,84
11	49.6129	9.9	10.6	10.2	11.01	11.4	10,62
12	45.4785	9.7	10.55	10.08	10.6	11.28	10,45
13	41.9802	9.5	10.4	9.95	10.43	11.16	10,29
14	38.9816	9.44	10.27	9.65	10.23	11.1	10,15
15	36.3828	9.4	10.25	9.6	10.15	11.04	10,09

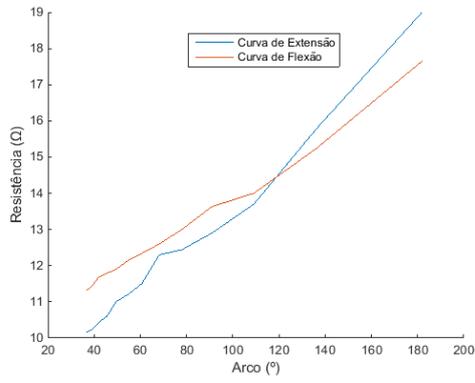
Tabela 4.2 – Medições dos Sensores - Procedimento de Flexão

Variação da resistência na Flexão							
Raio (cm)	Arco	S5 ( $\Omega$ )	S18 ( $\Omega$ )	S20 ( $\Omega$ )	S22 ( $\Omega$ )	S27 ( $\Omega$ )	Média ( $\Omega$ )
15	36.3828	9.8	10.57	9.8	11.3	11.4	10,574
14	38.9816	9.9	10.8	10.2	11.43	11.69	10,8
13	41.9802	10	10.9	10.4	11.68	11.85	10,97
12	45.4785	10.2	11.24	10.7	11.79	11.93	11,16
11	49.6129	10.4	11.4	10.8	11.9	12.26	11,36
10	54.5742	10.8	11.65	11.09	12.14	12.45	11,62
9	60.6380	10.9	11.71	11.31	12.34	12.63	11,76
8	68.2178	11.4	12	11.69	12.6	12.8	12,1
7	77.9632	12.4	12.3	12.05	13	13.2	12,58
6	90.9570	12.9	13.5	12.45	13.63	13.58	13,21
5	109.1485	13.4	13.7	13.48	14	14.85	13,89
4	136.4356	15.2	15.8	14.6	15.25	16.18	15,41
3	181.9141	16.9	17.8	18.18	17.65	18.26	17,77

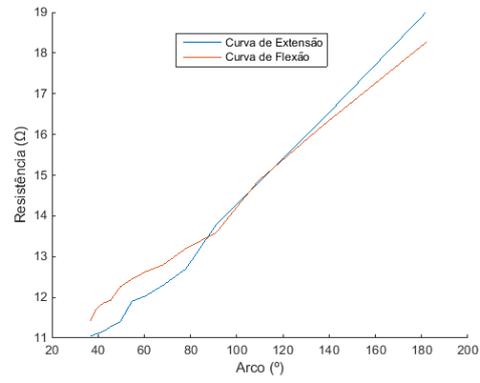
Na Figura 4.3 são mostradas as comparações entre as curvas de extensão e flexão de cada um dos sensores. Nas Figuras 4.3(a), 4.4(d) e 4.3(e) é possível visualizar que para grandes flexões há uma certa diferença entre as curvas de flexão e extensão. Isso se dá devido ao fato de que para as curvas de extensão o sensor foi subitamente flexionado, o que ocasionou num pico elevado da resistência. Já no procedimento de flexão o sensor iniciou completamente estendido e foi sendo flexionado aos poucos, o que permitiu ao sensor um período para que a resistência fosse se estabilizando.

Nas Figura 4.3(b) observa-se que a diferença entre as curvas de flexão e extensão é bem menor e na Figura 4.3 (c) é praticamente inexistente, isso se deve ao fato de que a medição do processo de extensão nesses sensores foi realizada esperando-se um tempo maior, permitindo assim que o sensor estabilizasse a resistência.

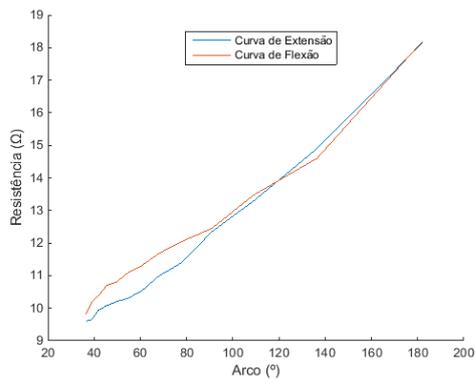
A partir dos resultados apresentados na Figura 4.3 concluiu-se que os sensores não apresentam diferença significativas entre medições para flexão e extensão, visto que apesar de haver um pico de resistência durante flexões abruptas, a recuperação e estabilização do sensor ocorre muito rapidamente.



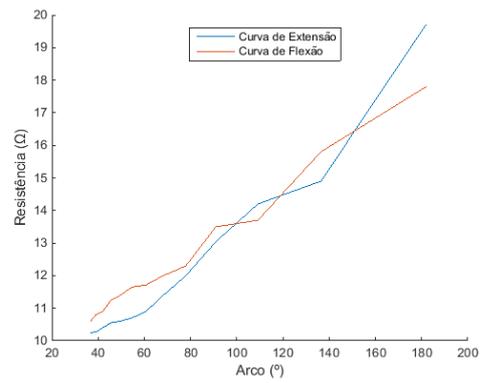
(a) Sensor Polegar



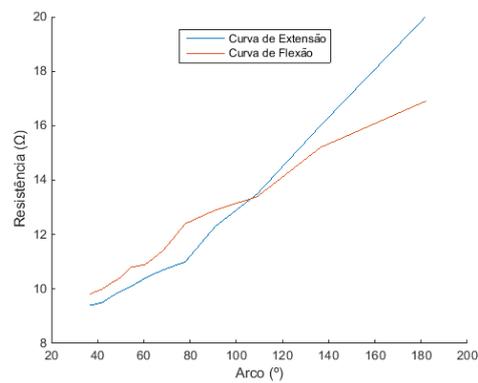
(b) Sensor Indicador



(c) Sensor Médio



(d) Sensor Anelar



(e) Sensor Mínimo

Figura 4.3 – Comparação entre as curvas de Extensão e Flexão dos Sensores

## 4.2 Circuito Divisor de tensão

A Tabela 4.3 mostra os limites mínimo e máximo de resistência verificados nos sensores já acoplados à luva, valores que foram usados como base para obtenção do sinal via divisor de tensão.

Tabela 4.3 – Valores dos Limites da Resistência dos Sensores

Dedos	Resistência Mínima	Resistência Máxima
Polegar	10,3	18,5
Indicador	10,4	20
Médio	9	19
Anelar	9,5	20
Mínimo	8,7	20,5

Através da realização do circuito divisor de tensão para condicionamento dos sensores pode-se obter a faixa de valores do sinal a ser aplicado nos servomotores para acioná-los. Para cada um dos sensores foi feito um divisor formado por uma fonte de 5V, fornecida pelo Arduino, ligada com a configuração em série de uma resistência de 22K ohms e do sensor (resistência variante). É importante ressaltar que o sinal enviado aos servos é baseado na queda de tensão sobre a resistência não variante.

A resistência mínima representa o dedo completamente esticado, enquanto que a resistência máxima representa o dedo completamente flexionado. Se a resistência do sensor aumenta, a resistência equivalente da associação em série também aumenta. Com isso a corrente no circuito diminui, fazendo com que a queda de tensão sobre a resistência fixa também diminua. Analogamente, quando a resistência do sensor diminui, obtém-se uma queda de tensão maior no resistor não variante.

Os valores das quedas de tensão lidas pelo Arduino são analógicos, estes foram convertidos em binários para obter uma saída digital para o controle dos servomotores. Na Tabela 4.4 são mostrados esses valores e a variação angular respectiva dos servomotores.

Tabela 4.4 – Valores de entrada analógica, saída digital e variação angular dos servos.

Dedos	Variação da tensão (V) fechada - aberta	Variação em binário fechado - aberto	Angulação do Servomotor fechado - aberto
Polegar	2,7160 - 3,4056	556 - 697	50° - 160°
Indicador	2,6190 - 3,3951	536 - 695	70° - 160°
Médio	2,6829 - 3,5484	549 - 726	70° - 160°
Anelar	2,6190- 3,4921	536 - 715	50° - 160°
Mínimo	2,5882 - 3,5831	530 - 733	30° - 160°

### 4.3 Protótipo

Após a realização dos testes com os sensores e do circuito de condicionamento fez-se a aplicação dos sensores à luva, a configuração final é mostrada na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Luva sensorizada.

Depois das etapas referentes aos sensores, seguiu-se para a montagem da estrutura da mão artificial após a impressão 3D das partes. Algumas partes houve a necessidade de serem coladas, que eram partes de fixação permanente. Já nas partes móveis, as articulações dos dedos, foram usados contra-pinos como eixos de cada articulação.

Para exercer a função dos tendões foi utilizada linha de pesca trançada visto que o Nylon, que estava previsto para ser usado, possui característica elástica tornando sua utilização inviável.

Após realizar a passagem dos cabos internamente à estrutura da mão artificial, estes foram conectados às polias acopladas aos eixos dos servomotores. Na Figura 4.5 é possível visualizar a montagem final da mão artificial. A Figura 4.6 mostra o esquema de tendões ligados aos servos.



Figura 4.5 – Estrutura da mão artificial.

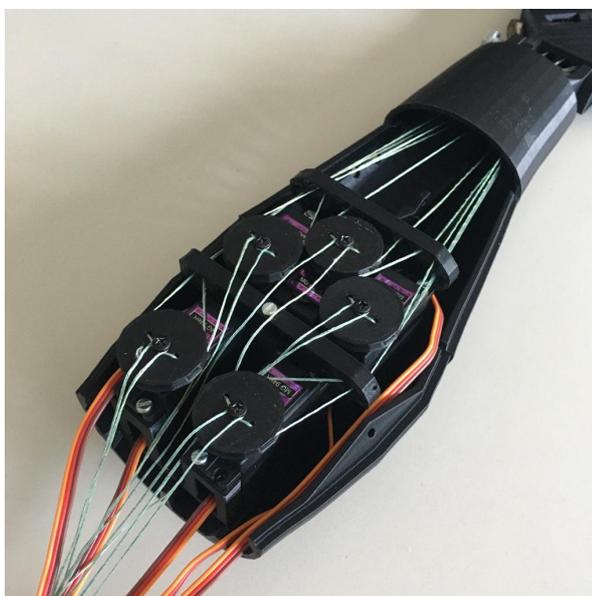
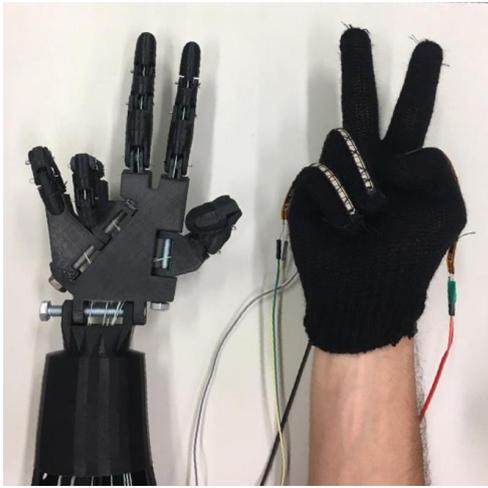


Figura 4.6 – Conexões dos tendões aos servomotores.

Após a conclusão das etapas de construção do dispositivo deu-se início à fase de testes a fim de obter dados referentes ao funcionamento, com o intuito de verificar a correspondência de movimentos da mão artificial com a mão do usuário da luva sensorizada. Nesta etapa foram realizados diversos movimentos e gestos que podem ser vistos na Figura 4.7.



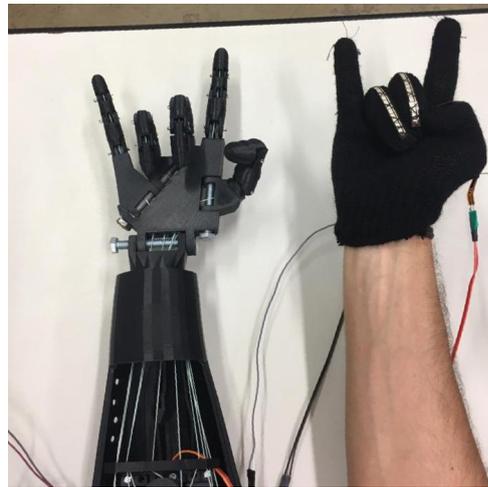
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.7 – Testes realizados com o dispositivo.

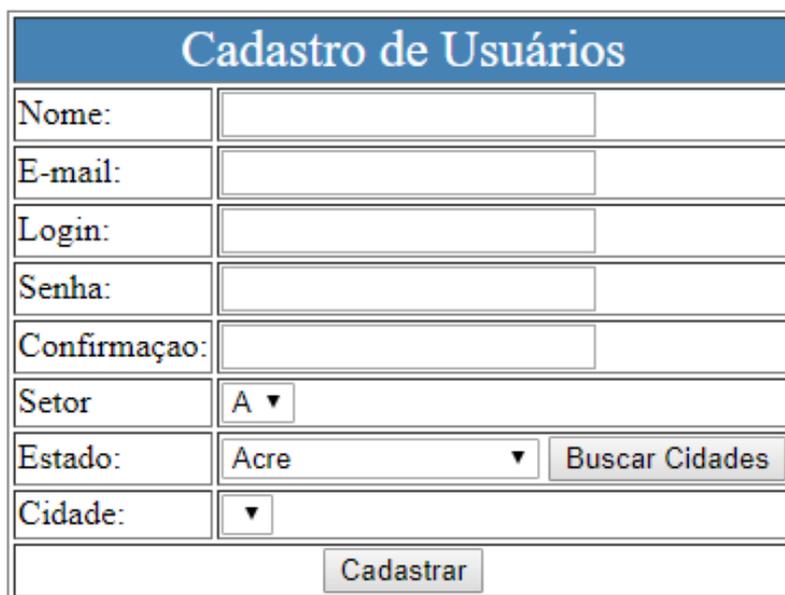
## 4.4 Aplicação Web

Para realizar o acesso ao protótipo foi desenvolvida uma aplicação *Web*. O primeiro passo desenvolver uma tela de início para o usuário efetuar o *Login* caso já possua cadastro, caso contrário, realizar o cadastro. Para realizar o cadastro estipulou-se que fossem coletados sete dados: nome, *e-mail*, *Login*, senha, setor, estado e cidade. A Figura 4.8 mostra o resultado da tela desenvolvida para o *Login*, já a Figura 4.9 mostra a tela de cadastro.



A screenshot of a web form titled "Acessar Sistema". It features a blue header with the title in white. Below the header, there are two input fields: "Login:" and "Senha:". At the bottom, there are two buttons: "Logar" and "Cadastro".

Figura 4.8 – Tela de Login.



A screenshot of a web form titled "Cadastro de Usuários". It features a blue header with the title in white. Below the header, there are seven input fields: "Nome:", "E-mail:", "Login:", "Senha:", "Confirmação:", "Setor" (with a dropdown menu showing "A"), and "Estado:" (with a dropdown menu showing "Acre" and a "Buscar Cidades" button). At the bottom, there is a "Cidade:" dropdown menu and a "Cadastrar" button.

Figura 4.9 – Tela de cadastro de usuários.

Os dados cadastrados e posteriormente utilizados pelos usuários para acessar o sistema são salvos no banco de dados do sistema. O banco de dados que foi criado é composto por seis tabelas, sendo elas:

- usuario: tabela com os dados cadastrados por cada usuário;

- registro: tabela contendo o registro de *Login* e de ações executadas pelos usuários;
- setor: tabela com os setores;
- tb\_estados: tabela com o registro dos estados;
- tb\_cidades: tabela com o registro das cidades;
- dedo: tabela dos dedos da mão mecânica.

Na Figura 4.10 é mostrado o Modelo Entidade Relacionamento do banco de dados desenvolvido que, como sugere o nome, consiste no modelo conceitual para descrever os objetos (entidades) com suas características (atributos) e como elas se relacionam entre si. O MER representa a estrutura abstrata do banco de dados da aplicação em questão.

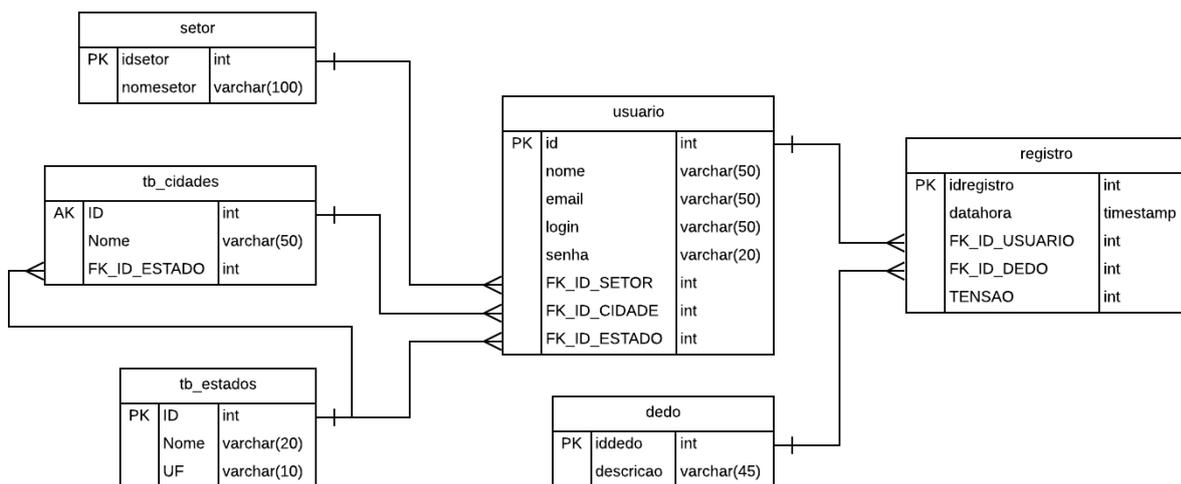


Figura 4.10 – Modelo Entidade Relacionamento.

Por fim foi desenvolvida a página exibida para o usuário ao efetuar *Login*. Esta permite acessar o histórico de acesso e uso do dispositivo e também acompanhar o comportamento do protótipo durante a sua utilização. A Figura 4.11 mostra esta tela.

O projeto desenvolvido para a aplicação *Web* está disponível em:

<https://github.com/pedrosilveiragui/robotichand/tree/master/RoboticHand>

Registro de acessos						
IDRegistro	Data	Hora	FK_ID_USUARIO	Nome	FK_ID_DEDO	Tensao
21412	2019-12-06	07:45:24	4	Pedro	2	2381
21413	2019-12-06	07:45:24	4	Pedro	3	2490
21414	2019-12-06	07:45:24	4	Pedro	4	2465
21415	2019-12-06	07:45:24	4	Pedro	5	2555
21416	2019-12-06	07:45:25	4	Pedro	3	2314
21417	2019-12-06	07:45:25	4	Pedro	4	2224
21418	2019-12-06	07:45:25	4	Pedro	5	2248
21419	2019-12-06	07:45:25	4	Pedro	1	2352
21420	2019-12-06	07:45:25	4	Pedro	3	2544
21421	2019-12-06	07:45:25	4	Pedro	4	2514
21422	2019-12-06	07:45:25	4	Pedro	5	2590
21423	2019-12-06	07:45:26	4	Pedro	1	2192
21424	2019-12-06	07:45:26	4	Pedro	1	2011
21425	2019-12-06	07:45:26	4	Pedro	3	2333
21426	2019-12-06	07:45:26	4	Pedro	1	2346
21427	2019-12-06	07:45:27	4	Pedro	3	2549
21428	2019-12-06	07:45:27	4	Pedro	5	2448
21429	2019-12-06	07:45:27	4	Pedro	5	2590
21430	2019-12-06	07:45:27	4	Pedro	5	2397
21431	2019-12-06	07:45:28	4	Pedro	5	2593
21432	2019-12-06	07:45:28	4	Pedro	1	1718
21433	2019-12-06	07:45:28	4	Pedro	2	1878
21434	2019-12-06	07:45:29	4	Pedro	2	2288
21435	2019-12-06	07:45:29	4	Pedro	2	1935

Figura 4.11 – Modelo Entidade Relacionamento.



## Considerações finais

### 5.1 Conclusões

Para a realização do presente trabalho foram realizadas etapas de pesquisa científica nas áreas abordadas pela monografia em questão. Elaborou-se uma revisão de literatura que traça o contexto histórico acerca do tema a fim de ilustrar a evolução tecnológica de manipuladores robóticos operados remotamente, bem como da utilização de técnicas de sensoriamento de movimentos humanos para realizar o controle dessas operações. Foram explorados trabalhos práticos e de pesquisa desenvolvidos nos últimos anos, a fim de obter uma projeção do que se tem de produções científicas já realizadas que possam de alguma forma agregar no desenvolvimento desta monografia. O referencial teórico para o trabalho foi desenvolvido com base em conceitos e ideias apresentados em livros, artigos e trabalhos acadêmicos de diversos autores nacionais e internacionais. São debatidos assuntos para compreensão acerca do método de impressão 3D, das propriedades da mão humana e de técnicas de utilização de servomotores, de SFRs e do Arduino. Posteriormente foi elaborada uma metodologia para a construção do trabalho onde são evidenciados os métodos a serem utilizados em cada uma de suas etapas. Também são apresentados os diagramas dos circuitos eletrônicos de aquisição das medições e de acionamento da mão artificial. Por fim são apresentados os resultados obtidos durante e após a conclusão da construção do dispositivo.

Foi construído um dispositivo que consiste numa mão artificial atuada pelos movimentos da mão de um usuário de uma luva sensorizada. Essa luva foi produzida acoplando-se sensores resistivos flexíveis sobre os dedos de uma luva de lã, o que permitiu medir os

movimentos dos dedos do usuário que vestiu a luva. Os sensores mencionados foram caracterizados relacionando o arco formado pelo sensor com a resistência equivalente a esta deflexão. Obteve-se então com base nesses dados uma curva linear para representar o comportamento do sensor. O circuito de aquisição de dados da luva consistiu de um divisor de tensão. Esse foi produzido conectando-se o sensor e uma resistência de 22k ohms em série com uma fonte de alimentação de 3.3V. A medição foi realizada sobre a resistência não variante e este sinal analógico foi convertido numa saída digital proporcional que foi enviado aos servomotores para realizar seu controle de posição. Isso permitiu concluir a comunicação entre a luva de controle e a mão artificial. Então foram realizados testes para averiguar a correspondência de movimentos entre a mão humana e a mão artificial que produziram resultados positivos mostrando assim que todos os objetivos deste documento foram atendidos. O protótipo obtido como produto final configura uma solução de baixo custo e viável aplicação, contudo é importante salientar que possui caráter mais experimental e inicial, visto que ainda é apenas um protótipo. Apesar de possuir limitações, como por exemplo o tipo de material utilizado para a fabricação da mão, podem ser desenvolvidas melhorias a fim e conferir ao dispositivo características específicas ao tipo de aplicação.

## 5.2 Proposta de Continuidade

Como proposta de continuidade deste trabalho sugere-se:

- Controlar os movimentos da mão artificial a partir de sinal eletromiográfico e adaptar o protótipo para desempenhar o papel de prótese para deficientes;
- Realizar o controle de outros dispositivos a partir da luva sensorizada produzida, associando os movimentos da mão à execução de tarefas distintas às objetivadas neste trabalho;
- Adaptar a mão artificial e a luva utilizando sensoriamento para transmissão de sensibilidade, permitindo assim que o usuário da luva consiga sentir objetos dentro da mão artificial e tenha controle sobre a força aplicada a estes objetos;
- Utilizar a luva sensorizada como um meio de auxílio em tratamentos de fisioterapia de pessoas com problemas motores nas mãos;
- Adaptar a luva para interpretar a linguagem de sinais fazendo com que, de acordo com os movimentos realizados por uma pessoa que possui deficiência de fala, sejam emitidos os sons referentes ao que a pessoa deseja falar.



# Bibliografia

- ALBERNAZ, Diego. **Manipulador robótico de acionamento remoto**. 2015. f. 59. Monografia (TCC) – Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP.
- AZEVEDO, Fábio Mariotto de et al. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- BOOCH, Grady; JACOBSON, Ivar; RUMBAUGH, James. **Uml: Guia do Usuário**. 1. ed. [S.l.]: Campus, 2006.
- CARVALHO, Maria de Fátima Ribeiro. **Desenvolvimento de matrizes de sensores piezoresistivos para aplicações avançadas**. 2014. Diss. (Mestrado) – Universidade do Minho.
- COELHO, Renato Ramos et al. Desenvolvimento de um sistema de captura de movimento de baixo custo. In: SYMPOSIUM of Virtual and Augmented Reality. [S.l.: s.n.], 2011.
- COOPERATI. **Conceituando Banco de Dados e SGBD**. 2019. Disponível em: <<http://cooperati.com.br/2012/08/19/banco-de-dados-conceituando-banco-de-dados-e-sgbd/>>. Acesso em: 2 jun. 2019.
- COUTO PITTA, Antônio José do et al. Implementação de uma luva sensorizada para controle de robôs teleoperados. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2018.
- DATE, C. J. **Introdução a Sistemas de Banco de Dados**. 8. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2004.
- ENGELBERGER, Joseph F. Robotics in the 21st century. **Scientific American**, Scientific American Inc., v. 273, n. 3, p. 166–166, 1995.

- FRANCISCATTO, Roberto; CRISTO, Fernando de; PERLIN, Tiago. **Rede de Computadores**. [S.l.]: e-Tec Brasil, 2014.
- FU, King Sun; GONZALEZ, Ralph; LEE, CS George. **Robotics: Control Sensing. Vis.** [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 1987.
- GALLO, Michael A.; HANCOCK, Wiliam M. **Comunicação entre Computadores e Tecnologias de Redes**. 1. ed. [S.l.]: Thomson Learning, 2003.
- GENTNER, Reinhard; CLASSEN, Joseph. Development and evaluation of a low-cost sensor glove for assessment of human finger movements in neurophysiological settings. **Journal of neuroscience methods**, Elsevier, v. 178, n. 1, p. 138–147, 2009.
- GODOY, Anderson. **A diferença entre ABS e PLA**. Fev. 2018. Disponível em: <<https://blog.escoladeimpressao3d.com.br/qual-e-a-diferenca-entre-abs-e-pla+227315>>.
- HOKAYEM, Peter F; SPONG, Mark W. Bilateral teleoperation: An historical survey. **Automatica**, Elsevier, v. 42, n. 12, p. 2035–2057, 2006.
- INGRAM, James N et al. The statistics of natural hand movements. **Experimental brain research**, Springer, v. 188, n. 2, p. 223–236, 2008.
- JIN, Shuai et al. Interaction and control with the auxiliary of hand gesture. In: INTERNATIONAL Conference on Information Science and Technology. [S.l.: s.n.], mar. 2011. p. 1362–1366. DOI: 10.1109/ICIST.2011.5765090.
- JURGENS, Jennifer; PATTERSON, PE. Development and evaluation of an inexpensive sensor system for use in measuring relative finger positions. **Medical engineering & physics**, Elsevier, v. 19, n. 1, p. 1–6, 1997.
- KACZMAREK, Adam S. **Sensing bending in a compliant biomimetic fish**. 2006. Tese (Doutorado) – Massachusetts Institute of Technology.
- KIM, Ji-Hwan; THANG, Nguyen Duc; KIM, Tae-Seong. 3-D hand motion tracking and gesture recognition using a data glove. In: 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. [S.l.: s.n.], jul. 2009. p. 1013–1018. DOI: 10.1109/ISIE.2009.5221998.
- KRISHNAMURTHY, Balachander; REXFORD, Jennifer. **Redes para a Web**. Rio de Janeiro: Campus Ltda., 2001.
- LANGEVIN, Gael. **InMoov**. 2012. Disponível em: <<http://inmoov.fr/>>.

- LONGARETTI, Dionatas. **Implementação de uma luva microcontrolada para a captura de gestos**. 2015. f. 63. Monografia (TCC) – Faculdade de Odontologia, Universidade Camilo Castelo Branco, Alegrete, RS.
- LUVIZON, Jariel Guilherme. **Segurança e desempenho em aplicações web utilizando JAAS, GlassFish e PostgreSQL**. [S.l.], dez. 2012.
- MACIEL, Clayton LM; SILVA, Rafael C; BARBOSA, Luis Filipe Wiltgen. CONTROLE À DISTÂNCIA UTILIZANDO UM PROTÓTIPO EXPERIMENTAL DE UM LUVA SENSORIADA. **XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação**, p. 515–518, 2007.
- MANSEUR, Rachid; BEARDEN, Chadwick E; KELBERT, John C. Teaching a Robot by Hand Motion. In: IEEE. PROCEEDINGS of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.l.: s.n.], 1992. v. 2, p. 1280–1283.
- MOTA, Allan. **Controlando um servomotor com Arduino**. 2017. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/o-que-e-servomotor/>>.
- MURPHY, Robin R. **Introduction to AI robotics**. [S.l.]: MIT press, 2000.
- NASCIMENTO, Lucas et al. METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DE UM SENSOR DE FLEXÃO. In:
- NATHAN, Dominic E; JOHNSON, Michelle J; MCGUIRE, John R. Design and validation of low-cost assistive glove for hand assessment and therapy during activity of daily living-focused robotic stroke therapy. **Journal of Rehabilitation Research & Development**, v. 46, n. 5, 2009.
- NIEDERAUER, Juliano; PRATES, Rubens. **MySQL Guia de Consulta Rápida**. São Paulo: Novatec Editora Ltda., 2006.
- ORENGO, Giancarlo; SAGGIO, Giovanni et al. Advanced characterization of piezoresistive sensors for human body movement tracking. In: PROCEEDINGS of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. [S.l.: s.n.], maio 2010. p. 1181–1184. DOI: 10.1109/ISCAS.2010.5537306.
- ORENGO, Giancarlo; SBERNINI, Laura et al. Curvature characterization of flex sensors for human posture recognition. **Universal Journal of Biomedical Engineering**, Horizon Research Publishing, v. 1, n. 1, p. 10–15, 2013.

- PALMA, Luciano; PRATES, Rubens. **TCP/IP Guia de Consulta Rápida**. São Paulo: Novatec Editora Ltda., 2000.
- PAZOS, Fernando. **Automação de sistemas & robótica**. [S.l.]: Axel Books, 2002.
- PEREIRA, J Nunes. **Efeito piezoresistivo em polímeros condutores em substrato flexível**. 2009. Tese (Doutorado).
- PONTICELLI, Roberto; SANTOS, P. Gonzalez de. Full perimeter obstacle contact sensor based on flex sensors. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 147, n. 2, p. 441–448, 2008.
- PUAUX, Jean-Pierre et al. A Study of L-Lactide Ring-Opening Polymerization Kinetics. In: WILEY ONLINE LIBRARY, 1. MACROMOLECULAR Symposia. [S.l.: s.n.], 2007. v. 259, p. 318–326.
- RIBEIRO, Deivyson Bruno Silva. **Mão biônica controlada por luva de sensores**. 2015. f. 39. Monografia (TCC) – Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, MG.
- RIZVI, R; NAGUIB, H. Development and characterization of piezoresistive porous TPU-MWNT nanocomposites. In: AIP, 1. AIP Conference Proceedings. [S.l.: s.n.], 2014. v. 1593, p. 383–387.
- SAGGIO, Giovanni; BOCCHETTI, Stefano et al. Wireless data glove system developed for HMI. In: IEEE. 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010). [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5.
- SAGGIO, Giovanni; LAGATI, Antonino; ORENCO, Giancarlo. Shaping resistive bend sensors to enhance readout linearity. **ISRN Electronics**, Hindawi Publishing Corporation, 2012.
- SAGGIO, Giovanni; RIILLO, Francesco et al. Resistive flex sensors: a survey. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 25, n. 1, p. 013001, dez. 2015. DOI: 10.1088/0964-1726/25/1/013001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/1/013001>>.
- SANTOS GOMES, Fernando Henrique dos. **Comunicação bidirecional entre cliente e servidor web com Ajax Reverso**. [S.l.], jun. 2011.

- SHAMSIL, Arefin et al. Motion Tracking Glove for Human-Machine Interaction: Grasp & Release, 2010.
- SILBERSCHATZ, Abraham; KORTH, Henry F.; SUDARSHAN, S. **Sistema de Banco de Dados**. 5. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2006.
- SIMONE, Lisa K.; KAMPER, Derek G. Design considerations for a wearable monitor to measure finger posture. **Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation**, v. 2, n. 1, p. 5, mar. 2005. ISSN 1743-0003. DOI: 10.1186/1743-0003-2-5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/1743-0003-2-5>>.
- SMAGT, Patrick van der et al. Robótica dos movimentos humanos. Edição: Elsevier. **Journal of Physiology-Paris**, v. 103, n. 3-5, 2009.
- SOUZA, Giuliano Gonçalves de; OLIVEIRA, Gustavo Coelho Duarte; CIRCUNCISÃO ALVES, Thiago da. MÃO ROBÓTICA. In: ANAIS da Mostra Nacional de Robótica. Sorocaba, Brasil: [s.n.], 2015. p. 157–159.
- SUGIYAMA, Susumu; TAKIGAWA, Mitsuharu; IGARASHI, Isemi. Integrated piezoresistive pressure sensor with both voltage and frequency output. **Sensors and Actuators**, Elsevier, v. 4, p. 113–120, 1983.
- TANENBAUM, Andrew S. **Rede de Computadores**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2003.
- TORRES, Gabriel. **Rede de Computadores Curso Completo**. Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil Editora Ltda., 2001.
- TSAGARAKIS, NG et al. BabyGlove: a device to study hand motion control development in infants. In: CITESEER. EUROHAPTICS. [S.l.: s.n.], 2006.
- TURNER, Michael L et al. Development and testing of a telemanipulation system with arm and hand motion. In: ASME IMECE Symp. on Haptic Interfaces. [S.l.: s.n.], 2000.
- WANG, Po T et al. A durable, low-cost electrogoniometer for dynamic measurement of joint trajectories. **Medical engineering & physics**, Elsevier, v. 33, n. 5, p. 546–552, 2011.
- WEBSTER, John G. **Tactile Sensors for Robotics and Medicine**. 1st. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1988. ISBN 0471606073.

WENDLING, Marcelo. Sensores. **Universidade Estadual Paulista. São Paulo**, v. 2010, p. 20, 2010.

WOLF, Denis Fernando et al. Robótica móvel inteligente: Da simulação às aplicações no mundo real. In: SN. MINI-CURSO: Jornada de Atualização em Informática (JAI), Congresso da SBC. [S.l.: s.n.], 2009. p. 13.

XAVIER, Ricardo Taoni. Implementação de uma prótese ativa para membro superior de baixo custo. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2016.

ZHOU, Huiyu; HU, Huosheng. Human motion tracking for rehabilitation—A survey. **Biomedical Signal Processing and Control**, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 1–18, 2008.