



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES

Wederson Medeiros Silva

BioGlove: Protótipo de um transdutor de flexão bioinspirado

Belém – Pará

2019

Wederson Medeiros Silva

BioGlove: Protótipo de um transdutor de flexão bioinspirado

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia da Computação. Instituto de Tecnologia. Faculdade de Engenharia da Computação e Telecomunicações. Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa

Belém – Pará

2019

Wederson Medeiros Silva

BioGlove: Protótipo de um transdutor de flexão bioinspirado/ Wederson Medeiros Silva. – Belém – Pará, 2019-

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

Orientador: Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará – UFPa
Instituto de Tecnologia – ITEC

Faculdade de Engenharia da Computação e Telecomunicações – FCT, 2019.

1. Modo fantasma de segunda camada. 2. Taxa agregada. 3. *Vectoring*. 4. EVM. I.
Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues. II. Universidade Federal do Pará. III. Faculdade
de Engenharia da Computação e Telecomunicações. IV. BioGlove: Protótipo de um
transdutor de flexão bioinspirado

Wederson Medeiros Silva

BioGlove: Protótipo de um transdutor de flexão bioinspirado

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia da Computação. Instituto de Tecnologia. Faculdade de Engenharia da Computação e Telecomunicações. Universidade Federal do Pará.

Trabalho aprovado. Belém – Pará, 18 de março de 2019:

Conceito: .

Prof. Dr. Roberto Menezes Rodrigues
Orientador

**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A.
Costa**
Coorientador

**Prof. Dra. Josiane do Couto
Rodrigues**
Convidado 1

Belém – Pará
2019

Este trabalho é dedicado...

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Dr. ...

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”*

(Martin Luther King)

Resumo

Luvas embarcadas com sensores, também conhecidas como *data gloves*, permitem diversas interações com realidade virtual, robótica, controle, internet das coisas, dentre outras. Dentro da luva, para que seja possível medir a flexão dos dedos, existem soluções baseadas em fibra óptica, tinta condutiva, potenciômetros e os mais conhecidos sensores flex. Entretanto, em muitos projetos, o custo da luva se torna elevado por conta da tecnologia escolhida para mensurar os graus de flexão em cada um dos dedos. Com o propósito de diminuir custos de projetos que necessitam de uma *data glove*, foi desenvolvida a BioGlove, que é uma luva embarcada com sensores de flexão de baixo custo, placa microcontroladora que possui larga documentação e disponibilidade, além de um protocolo de comunicação simplificado. Além do mais, dentro do trabalho é proposto a avaliação de um sensor de flexão bioinspirado na mecânica dos dedos.

Palavras-chaves: Data glove. BioGlove. sensor de flexão. bioinspirado. baixo custo.

Abstract

Gloves embedded with sensors, also known as data gloves, allow various interactions with virtual reality, robotics, control, internet of things, and so on. Inside the glove, to be possible to measure finger flexion, there are solutions based on fiber optics, conductive ink, potentiometers and the well known flex sensors. However, in many projects, the glove's cost become high because of technology chosen to measure fingers' degrees flexion. With the purpose of decrease costs of projects that need a data glove, was developed the BioGlove, that is a glove embedded with low cost flex sensors, microcontroller board with extensive documentation and availability, as well as a simplified communication protocol. Furthermore, in the work is proposed the avaliation of a flex sensor bioinspired by finger mechanics.

Keywords: Data glove. BioGlove. flex sensor. bioinspired. low cost.

Listas de ilustrações

Figura 1 – Funcionamento de sistemas baseados em luvas	19
Figura 2 – (a) Movimento através do tendão e (b) <i>Exo-Glove</i> instalada.	19
Figura 3 – Funcionamento do potenciômetro linear.	21
Figura 4 – Placa Arduino modelo Nano.	22
Figura 5 – Módulos RF transmissor (esq.) e receptor (dir.).	23
Figura 6 – (a) Sistema biomecânico e (b) sistema desenvolvido.	25
Figura 7 – (a) Mão em posição inicial e (b) Mão após flexão.	25
Figura 8 – Movimentos da luva de (a) flexão e (b) extensão.	26
Figura 9 – Comandos a partir de flexões e extensões para controle do carrinho . .	30
Figura 10 – Costura do transdutor em um dedo.	33
Figura 11 – (a) Potenciômetro adaptado e (b) bateria.	34
Figura 12 – Dimensões aproximadas da PCI e seus componentes.	34
Figura 13 – Desenhos projetados no Kicad do (a) esquemático e (b) PCI.	35
Figura 14 – (a) Placa de fenolite cobreada e (b) com os componentes soldados. . . .	36
Figura 15 – Luva montada.	36
Figura 16 – Sensor de Flexão.	37
Figura 17 – Sensor flex comercial na mão durante a flexão.	38

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores de A para B	28
Tabela 2 – Valores de A para B e remapeados (R).	29
Tabela 3 – Valores recebidos dos dedos e comandos de movimento	32
Tabela 4 – Valores obtidos e número de posições entre 0 e 90 graus.	38
Tabela 5 – Desempenho de alimentação das luvas	40
Tabela 6 – Desempenho de alcance das luvas	42

Lista de abreviaturas e siglas

AM	<i>Amplitude Modulation</i>
I	Corrente elétrica
IDE	<i>Integrated Development Interface</i>
$k\Omega$	<i>Quiloohm</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LiPo	<i>Lithium-ion Polymer</i>
mAh	Miliampere hora
MHz	Megahertz
mm	Milímetro
PCI	Placa de Circuito Impresso
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
R	Resistência elétrica
RF	Radio frequênciā
V	Tensão

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Estado da arte	15
1.3	Motivação	17
1.4	Organização do trabalho	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Introdução	18
2.2	Movimentação dos dedos	18
2.3	Captura de movimentos	20
2.4	Potenciômetro	20
2.5	Microcontroladores	21
2.6	Transmissão de Sinal	22
3	TRABALHO PROPRIAMENTE DITO	24
3.1	Introdução	24
3.2	Mecânica Bioinspirada	24
3.2.1	Transdutor de Flexão	24
3.2.2	Adaptação na Luva	25
3.3	Programação do microcontrolador	26
3.3.1	Digitalização do sinal	26
3.3.2	VirtualWire	27
3.4	Ajustes	28
3.4.1	Introdução	28
3.4.2	Deslocamento e número de posições	28
3.4.3	Remapeamento	29
3.5	Protocolo de comunicação	29
3.5.1	Introdução	29
3.5.2	Posições e movimentos	30
3.5.3	Software de recepção	30
3.6	Montagem do protótipo	32
3.6.1	Transdutor de Flexão	32
3.6.2	Escolha de componentes	32
3.6.3	Posicionamento de componentes	34
3.6.4	Placa Embarcada	35

4	RESULTADOS E ANÁLISES	37
4.1	Introdução	37
4.2	Sensibilidade	37
4.3	Bateria	39
4.4	Alcance	41
5	CONCLUSÃO	43
5.1	Trabalhos futuros	44
	REFERÊNCIAS	45

1 Introdução

1.1 Contextualização

A biologia intriga e inspira a humanidade desde a antiguidade, a diversidade dos seres vivos observáveis em suas mais diversas formas e capacidades geram questionamentos e pesquisas até os dias de hoje.

Ainda na Grécia antiga, os pássaros com a sua capacidade natural de voar, serviram de base para um dos primeiros projetos bioinspirados de que se tem notícia. Acredita-se que por volta de 400 a.C., Archytas (430 - 360 a.C.) que foi um matemático e astrônomo, inventou uma pomba mecânica que deveria voar (LIVINGSTONE, 2014). Leonardo Da Vinci (1452 - 1519 d.C.), provavelmente inspirado pelo projeto de Archytas, criou uma pomba mecânica que deslizava sobre um cabo ao mesmo tempo em que batia suas asas. Tempos depois, por volta do século XIX, um dispositivo muito parecido era vendido como brinquedo (ROSHEIM, 2006).

Atualmente, dentre os materiais bioinspirados mais famosos está a tecnologia VELCRO® que foi baseada em uma planta chamada Bardana (*Arctium lappa*). Essa planta possui uma série de pequenos ganchos que grudam em alguns tecidos. Por conta desse comportamento, o VELCRO® é composto de duas partes, os ganchos e as voltas (COMPANIES, 2019). Especificamente na área da robótica, existe um robô em formato de salamandra que é capaz de se movimentar bem entre a água e a terra, há um pequeno robô inspirado na mosca que, devido ao seu formato, possui excelente decolagem vertical na hora do vôo. Existe ainda um robô que consegue escalar paredes através de um material adesivo que foi inspirado pela lagartixa (PFEIFER; LUNGARELLA; LIDA, 2007).

Contudo, ao longo dos anos, não somente os animais e plantas vem servindo de base para projetos de engenharia. O próprio Leonardo da Vinci, por exemplo, a partir dos seus estudos em corpos humanos dissecados, chegou a construir modelos mecânicos de músculos, juntas, braços, entre outros que foram usados em muitas de suas invenções (ROSHEIM, 2006).

Especificamente sobre a mão, sabemos que ela exerce uma importante função na interação do ser humano com diversas ferramentas do dia a dia, desde o uso de instrumentos de trabalho como o martelo, serrate e a chave de fenda, até o ato de manipular a comida usando garfo e faca para se alimentar. Na área da tecnologia, muitos periféricos também necessitam da mão para serem controlados, é o caso do teclado do computador, do controle remoto da televisão e dos famosos tablets e smartphones. Entretanto, em aplicações de realidade virtual a imersão se torna ainda melhor quando são usados movimentos naturais

do ser humano. Em um jogo de realidade virtual, por exemplo, será muito mais natural para o jogador alcançar um objeto virtual extendendo a sua mão, do que usar um *joystick* para isso. Neste caso especificamente, o uso de uma luva embarcada com diversos sensores pode deixar a interação ainda mais real para o usuário.

1.2 Estado da arte

Como foi dito previamente, muitas pesquisas observam e se baseiam em sistemas da natureza para criar modelos a serem estudados. Inspirado pela forma humana, foi desenvolvido um robô bípede autônomo que procura imitar a marcha humana durante seu deslocamento, com o intuito de testar teorias de locomoção e eficiência de movimento. Tal robô, possui pernas e braços muito maiores do que o seu torso, se comparado ao corpo humano, mas seu movimento é semelhante ao nosso. Durante a caminhada do robô quando, por exemplo, a perna direita está à frente da perna esquerda, o braço esquerdo fica à frente do braço direito e vice-versa. Durante os testes, o robô conseguiu se locomover à uma velocidade de até 0.44 m/s (1.58 km/h), com marcha relativamente estável. Dados mostraram que essa técnica mostrou uma eficiência de energia mecânica semelhante à de um ser humano, e com isso se estima que esse método ajudará a construir robôs caminhantes mais simples, eficientes, fáceis de controlar e mais práticos. Entretanto, seu custo ficou estimado em torno de 10 mil Dólares, a estrutura não se mostrou estável por longos períodos e a caminhada acontecia como esperado em 30% do tempo (Collins; Ruina, 2005).

Baseado em nossa biomecânica, existe um estudo de mapeamento dos movimentos do braço humano para controle de um braço robótico, onde os movimentos de flexão e extensão de um dos dedos e do pulso são adquiridos através de dois sensores resistivos de flexão comerciais, e um acelerômetro é responsável por mensurar movimentos do cotovelo. Esses dados são processados por um microcontrolador que por sua vez controla 4 servomotores montados em uma estrutura semelhante à de um braço robótico. Tal estrutura busca copiar os movimentos do braço do usuário através de 3 movimentos, ou graus de liberdade, independentes (SYED et al., 2012). Neste estudo é possível verificar que há uma conversão dos sinais analógicos em sinais digitais de uma forma proporcional, porém limitada. Além disso, o autor sugere que futuramente sejam adicionados protocolos para transmissão sem fio do sinal, o que pode dar uma maior liberdade de aplicações.

Especificamente na mão, luvas embarcadas com sensores podem captar diversos movimentos das mãos. Podem ser captados sinais sobre a flexão dos dedos, giro do pulso, ou até mesmo a altura da mão em relação ao solo. Com isso é possível realizar pesquisas que restrinjam minimamente o comportamento natural do usuário. Para auxiliar na área médica, por exemplo, foi desenvolvido o estudo de uma luva adaptável para medir a flexão

dos dedos de indivíduos com limitações nos movimentos da mão e dos dedos (SIMONE et al., 2004). O trabalho visa ser de baixo custo, limitar minimamente os movimentos naturais dos usuários, ser leve e de fácil aplicação e remoção. Tais requisitos servem para monitorar da melhor forma possível as atividades de pessoas com limitações de movimento em suas atividades diárias. Essa pesquisa utiliza sensores de flexão resistivos comerciais colados através de diferentes materiais em cada um dos cinco dedos da mão. Usando uma espécie de caixa de conexões, um computador é ligado à todos os sensores e realiza a conversão dos sinais analógicos em sinais digitais. Os dados são salvos à uma frequência de 100 vezes por segundo usando o *software* proprietário LabView. Os testes mostraram que apesar de os sensores responderem aos movimentos, ainda é preciso realizar uma calibração antes do uso, além de que alguns materiais adesivos que grudavam os sensores aos dedos, acabaram soltando após algum período de uso. Por ser uma aplicação que visa ser utilizada durante testes relativamente longos (cerca de 24 horas), a necessidade de ter um computador conectado constantemente aos sensores pode de certa forma atrapalhar nas atividades de cada usuário durante os testes. Talvez o uso de um computador menor, Raspberry Pi por exemplo, poderia melhorar esse aspecto durante os testes.

Em outros casos, luvas sensorizadas podem ser usadas para o controle de outros equipamentos, para receber e transmitir diversas informações relevantes a cada caso, ou podem ter funções ser genéricas que se encaixam em diversos casos. Um exemplo de luva multi-propósito é a 5DT Data Glove Ultra, que é uma espécie de luva sensorizada comercial capaz de capturar diversos movimentos da mão, usando sensores de flexão baseados em fibra ótica entre outros. É um produto que possui opção para transmissão de dados sem fio através de Bluetooth, além de poder ser integrado à *softwares* de captação de movimento e animação em 3D conhecidos no mercado. Além disso, possui seu próprio software de diagnóstico, gerenciamento, calibração e gravação de dados (INC., 2004). Todas essas características, fazem deste produto uma excelente ferramenta para realizar estudos sobre os movimentos das mãos, ou para o desenvolvimento e controle de outros produtos. Entretanto, seu custo pode chegar na faixa dos 1000 Dólares (INC., 2019), o que pode ser um custo elevado para alguns usuários ou pesquisadores. Além do mais, adaptações do hardware ou software que se fizerem necessárias, provavelmente não serão permitidas pelos desenvolvedores que detém os direitos deste produto.

Os trabalhos apresentados até aqui utilizam sensores comerciais disponíveis no mercado para mensurar os movimentos de flexão dos dedos, ou no caso da 5DT Data Glove, seu próprio sensor baseado em fibra ótica e de tecnologia fechada. Entretanto, existem pesquisas que buscam criar o próprio sensor de flexão. No trabalho de (FLORES et al., 2014) foram criados sensores improvisados usando fios, espumas condutoras, fita adesiva e pedaços de folhas de alumínio. O desempenho de tais sensores, foram comparados com sensores de flexão resistivos comerciais. Usando sensores improvisados, os autores estimam uma economia de até 90 % na construção de uma luva sensorizada. Entretanto, estes

sensores criados manualmente produzem saídas com muito ruído fazendo com que durante os testes, fosse necessário enfatizar bem cada movimento de flexão ou relaxamento dos dedos. Contudo, ainda assim foi possível criar um sistema binário de respostas que envia duas saídas, sensor relaxado ou sensor flexionado. Portanto, para aplicações nas quais fosse exigida uma precisão maior, usar este sensor improvisado poderia gerar respostas instáveis para a aplicação em uso.

1.3 Motivação

Apesar da gama de possibilidades com o uso de luvas sensorizadas, seu custo de montagem ou a obtenção de produtos comerciais possui custo elevado. Muitos projetos utilizam pelo menos 1 sensor flex em cada dedo, a compra de cada unidade desse sensor pode custar em lojas online especializadas em torno de 130 Reais (LTDA., 2019). Além disso, produtos comerciais costumam ter um hardware imutável e de difícil manutenção, pois somente equipes especializadas possuem o conhecimento técnico para efetuar reparos.

O trabalho proposto busca criar um protótipo de uma luva embarcada com sensor de flexão, microcontrolador e transmissor de dados. O sistema deve possuir um conjunto de software e hardware que seja mais flexível em relação à outros produtos, permitindo que o usuário tenha liberdade de realizar modificações que se adaptem às suas necessidades.

Um dos componentes em maior número e de maior custo em projetos de luvas como essa, são os sensores de flexão. Portanto esse trabalho também propõe avaliar a viabilidade de um sistema transdutor de flexão inspirado no movimento dos músculos e tendões da mão. Esse sensor deverá ser composto de materiais de baixo custo e de fácil acesso.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

No capítulo 2 apresenta-se a mecânica que inspirou a construção do sensor, o funcionamento da aquisição dos movimentos, detalhes sobre o potenciômetro que é a peça chave do sensor, e por fim, as características do microcontrolador e transmissor utilizados.

No capítulo 3 expõe-se mais detalhadamente o funcionamento do sensor, a adaptação do sensor na luva, o algoritmo de programação do software que trata o sinal recebido, os ajustes que foram necessários, além do protocolo de comunicação criado. Ao final é explicitado como todo o sistema foi construído e montado.

No capítulo 4 os resultados e análises dos testes realizados na BioGlove, em comparação à outras luvas desenvolvidas, são mostrados.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 Referencial Teórico

2.1 Introdução

Ao longo dos últimos anos, diversos trabalhos estão sendo realizados para mensurar os movimentos da mão e estes possuem as mais variadas motivações. A pesquisa de (LEE; PARK, 2009), por exemplo, criou um controle remoto baseado na abertura dos dedos. O sistema processa imagens de uma câmera em busca de comandos pré-configurados que respondem a abertura de dedos da mão. Ou seja, mostrou-se a possibilidade de usar os movimentos da mão como um meio para controle remoto. Além disso, existem trabalhos como (M, 2013) e (RAJAMOHAN; R.; M., 2013) que buscam traduzir gestos das mãos em palavras, buscando assim facilitar a comunicação de surdos e/ou mudos com outras pessoas. Já (KUMAR; VERMA; PRASAD, 2012) buscam uma interação humano-computador através do uso de uma luva. Nesse trabalho o autor demonstra que é possível realizar ações no computador, como desenhar ou manipular objetos tridimensionais, através de movimentos da mão pré-determinados.

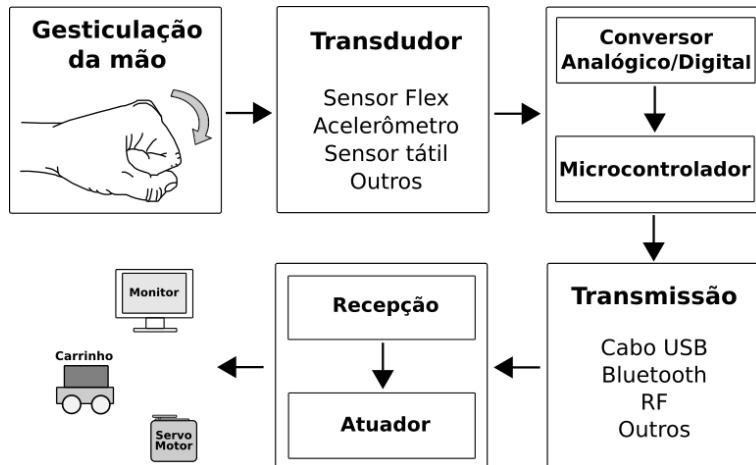
Dentre os produtos que ficaram famosos usando o movimento das mãos para controle, estão as luvas *Data Glove* e a *Power Glove*, ambas criadas nos anos 80. A primeira, foi desenvolvida por volta de 1986 e era usada para controlar um supercomputador, mas também foi utilizada pela *NASA (National Aeronautics and Space Administration)* para controlar robôs. Logo depois, por volta de 1987, uma licença foi comprada para desenvolver uma outra versão da luva, só que seria para uso do público em geral. Então, finalmente em 1989, através de uma parceria entre as empresas Mattel, Nintendo e AGE, foi lançada a *Power Glove* que serviria para controlar jogos de videogames (GARDNER, 1989).

Entre os demais sistemas que buscam mensurar flexão e extensão dos dedos estão (SYED et al., 2012) e (BORGHETTI; SARDINI; SERPELLONI, 2013). Estes e outros trabalhos, incluindo o trabalho proposto, nos quais utilizam luvas para auxiliar a captura dos movimentos dos dedos, costumam ter um bloco de funcionamento parecido ao da figura 1.

2.2 Movimentação dos dedos

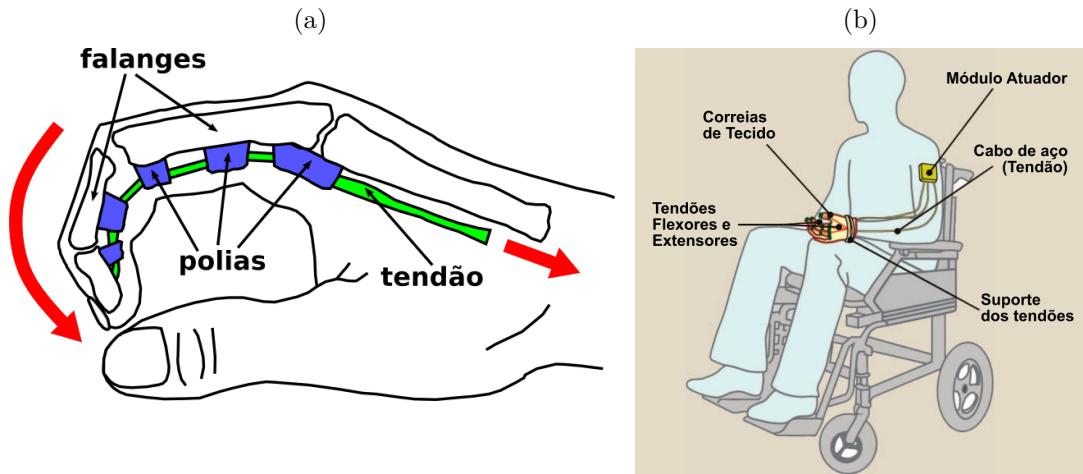
Na mão, os tendões funcionam como cordas que conectam os músculos do antebraço aos ossos da mão. Nos dedos, os tendões passam por dentro de uma série de polias, que formam uma espécie de túnel. Isso permite manter os tendões próximos aos ossos da mão, aumentando a força nos dedos e diminuindo o gasto de energia. Ao movimentar o dedo,

Figura 1 – Funcionamento de sistemas baseados em luvas



Fonte – Produzido pelo autor.

o músculo se contrai para que o tendão deslize por entre as polias (OLIVEIRA, 2018). Semelhante ao esquema demonstrado na figura 2 (a).

Figura 2 – (a) Movimento através do tendão e (b) *Exo-Glove* instalada.

Fonte – (a) Adaptado de (PRUZANSKY; PRUZANSKY, 2018) e (b) adaptado de (IN et al., 2015).

Existem pesquisas inspiradas nessa biomecânica. Em (IN et al., 2015), por exemplo, mostra-se o funcionamento da *Exo-Glove*, que é uma luva que auxilia o movimento dos dedos da mão de pessoas que sofreram alguma paralisia na região. O sistema roteia tendões artificiais (cabos de aço) vindos de um módulo atuador, passando por um suporte próximo ao pulso, por correias de tecido e chegando até os dedos. Usando esse aparelho, os movimentos de flexão e extensão dos dedos são auxiliados pelos cabos, tornando estes movimentos mais firmes ao usuário. A figura 2 (b) demonstra o sistema descrito.

2.3 Captura de movimentos

Os circuitos eletrônicos trabalham com sinais elétricos, ou seja, com correntes e tensões elétricas. Sendo assim, para medir grandezas físicas que não envolvam eletricidade, é preciso o uso de transdutores, que são dispositivos que convertem uma forma de energia em outra. Os transdutores muitas vezes são usados para sensoriar determinadas grandezas, e por conta disso também são conhecidos como sensores (BRAGA, 2012).

Muitas pesquisas que buscam mensurar os movimentos de flexão e expansão dos dedos, usam sensores de flexão comerciais semelhantes a (CORP, 2014). O trabalho de (RAJAMOHAN; R.; M., 2013) traduz gestos definidos na linguagem americana de sinais em texto e áudio. Dessa forma, há uma melhor comunicação de pessoas surdas ou mudas com outras pessoas que não são familiarizadas com a linguagem de sinais. A captura de flexões e extensões dos dedos são realizadas por sensores de flexão, enquanto que as direções, durante os gestos da mão, são captados por um acelerômetro. Um microcontrolador reconhece os movimentos, gera palavras e as converte em áudio através de um módulo.

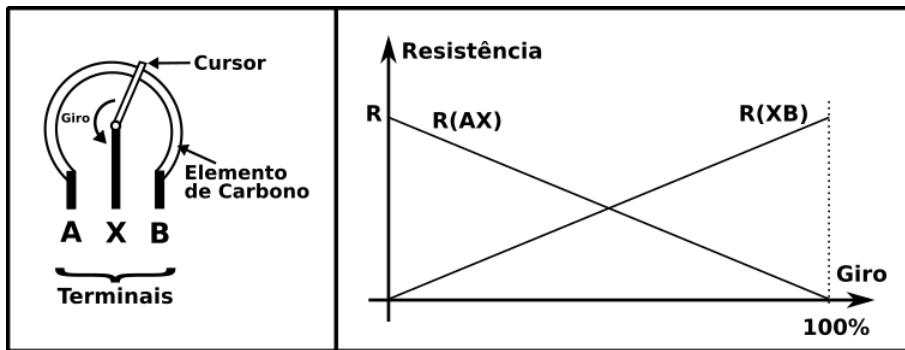
A *Data Glove* usava fibra óptica e fotoresistores para saber as posições de cada dedo. De acordo com a flexão do sensor, o nível de luz que chegava ao fotoresistor variava indicando a posição atual. Já a *Power Glove*, buscou reduzir custos e preferiu trocar essa tecnologia. Passou a usar placas com tintas que variavam suas propriedades condutivas quando torcidas (GARDNER, 1989).

2.4 Potenciômetro

O potenciômetro é um componente eletrônico que permite, através do giro do seu eixo, a variação da resistência entre seus terminais. Eles são constituídos por um elemento de resistência, que pode ser de carbono ou fio de nicromo, sobre o qual corre uma lingueta, denominada cursor. Dentre as características do potenciômetro estão o valor máximo de sua resistência, seu número de voltas, seu grau máximo de giro (aproximado) e se ele é do tipo linear ou logarítmico (BRAGA, 2012).

A figura 3 demonstra resumidamente o funcionamento do potenciômetro linear, a saída dos terminais é variada de acordo com o giro do cursor. Segundo a lei de Ohm ($V = R \cdot I$), dada uma corrente constante, ao variar a resistência teremos uma variação da tensão. Sendo assim, ao girar o eixo do potenciômetro, dependendo do sentido do giro, perceberemos um aumento ou diminuição da tensão naquele ponto. Partindo de um ponto extremo com resistência mínima até o outro no qual a resistência deverá ser a máxima característica do componente.

Figura 3 – Funcionamento do potenciômetro linear.



Fonte – Modificado de (BRAGA, 2012).

2.5 Microcontroladores

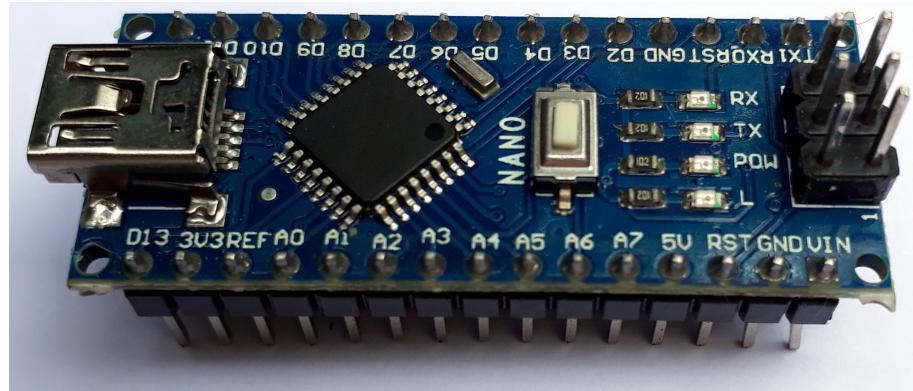
Por volta da década de 80 surgiram os primeiros microcontroladores, dispositivos com memória RAM (*Ramdon Access Memory*), ROM (*Read Only Memory*), clock interno, E/S (Entrada e Saída), entre outros. Por conta dessas características, os microcontroladores permitiram que projetos de dispositivos inteligentes se tornassem mais simples. Eles eram chamados por muitas vezes de computadores em um único chip (PEREIRA, 2002).

Em (BORGHETTI; SARDINI; SERPELLONI, 2013) o microcontrolador HC9S08QB8, da fabricante Freescale, consegue trabalhar na faixa de tensão requerida pelo projeto, consume pouca energia e juntamente ao transceptor MAX 1412 é capaz de diminuir a complexidade de transmissão, além de outras características. Já em (RAJAMOHAN; R.; M., 2013), o microcontrolador ATmega 328 é utilizado para mostrar uma saída de texto em uma pequena tela LCD e juntamente ao chip TTS256 converter esse texto em som.

Existem ainda, soluções que buscam facilitar o uso do microcontrolador. o Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto que é baseada em *hardware* e *software* fáceis de usar. As placas Arduino são capazes de ler entradas como o acionamento de um sensor ou pressionamento de um botão. Pode transformar essas entradas em saídas como a ativação de um motor ou a publicação de algo online. Essa placa pode ser programada usando sua IDE (*Integrated Development Interface*), que por sua vez, envia as instruções necessárias para o microcontrolador instalado na placa.(LICENSE, 2018)

No trabalho proposto, a placa Arduino modelo Nano com o microcontrolador ATmega328 embarcado, é utilizada para receber os sinais dos transdutores, converter os sinais analógicos em digitais, codificar estes sinais e enviá-los. A figura 4 mostra a placa utilizada no projeto.

Figura 4 – Placa Arduino modelo Nano.



Fonte – Produzido pelo autor.

2.6 Transmissão de Sinal

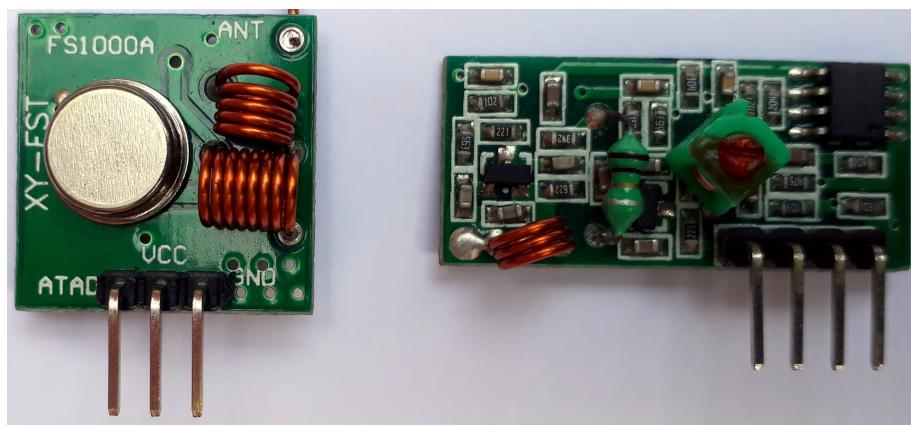
Existem várias formas de transmissão de sinal em projetos com luvas. Em (M, 2013), através de fios, a saída de texto do microcontrolador é transmitida e mostrada em uma pequena tela de LCD. No trabalho de (SYED et al., 2012) os fios conectam o microcontrolador diretamente à servomotores que controlam um braço robótico.

Para transmissões sem fio existem diversas opções. Na Power Glove (GARDNER, 1989) o sistema utilizado foi o ultrassom. Sendo que, na luva dois emissores de som ultrassônico enviam as informações necessárias para dois microfones localizados próximos à TV. Já o trabalho de (KUMAR; VERMA; PRASAD, 2012) utiliza a DG5 VHand 2.0 em sua pesquisa. Essa é uma luva comercial equipada com sensores detectores de flexão e movimentos, que usa Bluetooth para se comunicar com o computador.

Em (BORGHETTI; SARDINI; SERPELLONI, 2013), a transmissão de sinal é realizada via rádio frequência, com o auxílio de um transceptor. Um transceptor é um sistema no qual estão presentes tanto o transmissor quanto o receptor de sinal em um mesmo módulo (BULLOCK, 2017).

Outra opção para usar transmissão em rádio frequência é usar o receptor e o transmissor separadamente. No trabalho proposto usa-se o módulo RF (Rádio Frequência) 433 MHz, composto por um par que contém um transmissor (modelo XY-FST) e um receptor (modelo XY-MK-5V), ambos mostrados na figura 5. O par opera com modulação AM (*Amplitude Modulation*) e é considerado uma alternativa para projetos de baixo custo que querem usar comunicação sem fio entre microcontroladores Arduino ou entre outros. O par de módulos pode alcançar até 200 metros sem obstáculos, usando antenas e dependendo da tensão aplicada (DIGITAL, 2018).

Figura 5 – Módulos RF transmissor (esq.) e receptor (dir.).



Fonte – Produzido pelo autor.

3 Trabalho Propriamente Dito

3.1 Introdução

O capítulo a seguir está organizado em 5 seções. Na primeira delas explica-se a movimentação mecânica do sistema e como as posições de flexão e extensão dos dedos são obtidas pelo microcontrolador. A segunda aborda a programação do microcontrolador, mais precisamente o tratamento dos dados recebidos a partir dos potenciômetros. A terceira seção explica os ajustes realizados em software. A quarta explica o protocolo criado para controlar um carrinho via rádio frequência. A quinta e última seção explica como o sistema foi montado.

3.2 Mecânica Bioinspirada

3.2.1 Transdutor de Flexão

Como foi explicitado previamente, através dos tendões, têm-se a movimentação dos dedos na mão. Baseado nessa biomecânica, foi desenvolvido um sistema mecânico semelhante que visa criar um transdutor de flexão de dedos conectado a um microcontrolador.

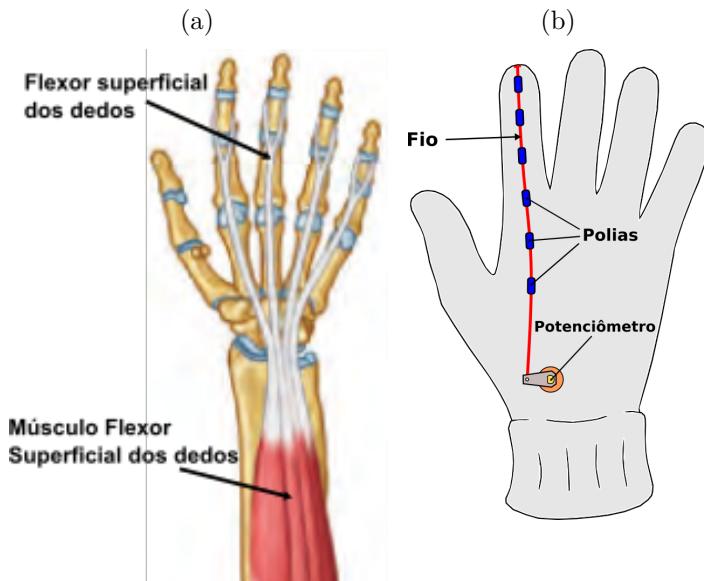
De uma forma resumida, no sistema natural de movimentação dos dedos, a extremidade do tendão está presa na ponda de uma das falanges do dedo. A extensão do tendão enquanto sua extensão desliza por dentro de polias até o músculo. No sistema desenvolvido, cada transdutor é composto por uma linha de náilon presa ao dedo da luva, guiada através de pequenos segmentos plásticos até o cursor de um potenciômetro. A figura 6 demonstra um pouco dos dois sistemas.

Logo no inicio do trabalho, foi formulada a hipótese de que poderia haver a movimentação de um fio durante a flexão de um dedo. Portanto foi realizado um experimento para verificar tal hipótese.

Sendo assim, o primeiro passo foi, com a mão inicialmente estendida com o dorso voltado para cima, uma das pontas de um fio foi presa na extremidade de um dos dedos. O local da outra ponta do fio foi marcada no dorso mão. Como é demonstrado na figura 7 (a).

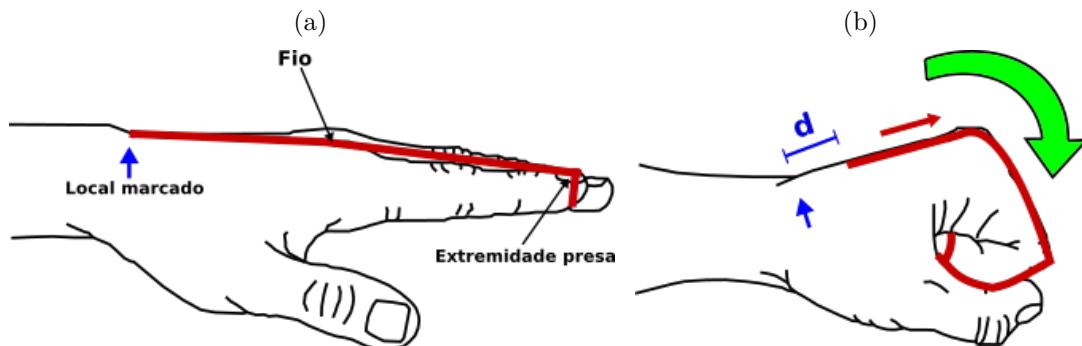
Após a flexão dos dedos, verificou-se que o fio se movimentou em uma direção e criou um deslocamento (d) do fio em relação ao ponto marcado, mostrado na figura 7 (b). Esse experimento validou a hipótese formulada previamente.

Figura 6 – (a) Sistema biomecânico e (b) sistema desenvolvido.



Fonte – (a) Adaptado de (MOORE; DALLEY; AGUR, 2013) e (b) produzido pelo autor.

Figura 7 – (a) Mão em posição inicial e (b) Mão após flexão.



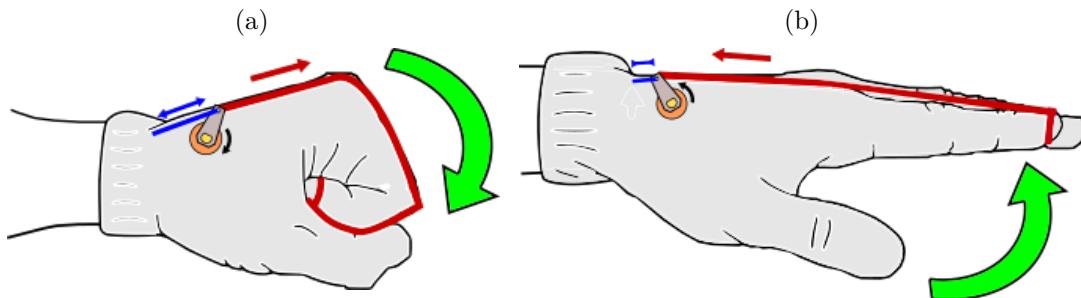
Fonte – Produzido pelo autor.

3.2.2 Adaptação na Luva

Após as polias e o fio de náilon serem devidamente embarcados na luva juntamente ao potenciômetro, com a mão estendida e mantendo o fio de náilon tensionado, ao flexionar o dedo, o fio é puxado pela ponta do dedo e com isso o cursor do potênciometro é variado. Porém, após a flexão do dedo, ao realizar o movimento inverso (extensão), não há força que movimente o fio de náilon e nem o cursor do potenciômetro de volta às suas posições iniciais. Para possibilitar que o sistema retorne à sua posição inicial, um pequeno elástico foi instalado junto ao cursor do potenciômetro. Usando o elástico durante o movimento de flexão, o cursor gira e estica o elástico. Estando esticado, o elástico busca retomar sua posição de equilíbrio realizando uma força contrária para girar o cursor de volta à sua posição inicial. Figura 8 (a). Quando há o movimento de extensão do dedo, o elástico puxa

o cursor do potenciômetro girando-o em sentido inverso ao que ocorreu durante a flexão. Isso acontece enquanto o elástico estiver esticado o suficiente para exercer força sobre o cursor do potenciômetro. Demonstrado na figura 8 (b)

Figura 8 – Movimentos da luva de (a) flexão e (b) extensão.



Fonte – Produzido pelo autor.

3.3 Programação do microcontrolador

3.3.1 Digitalização do sinal

Na luva, além do transdutor, há um microcontrolador que capta os movimentos do potenciômetro e os digitaliza. O sinal chega em portas analógicas de um Arduino modelo Nano que converte a variação de tensão do potenciômetro em valores inteiros entre 0 e 1023.

Para facilitar a abordagem do trabalho, cada dedo da luva e seu respectivo potenciômetro é representado por um número de 1 a 5, começando pelo dedo mínimo (1) até o polegar (5). Também foram definidas duas posições principais para analisar o movimento dos dedos. Posição A: Quando todos os dedos estiverem estendidos. Posição B: Quando todos os dedos estiverem flexionados. Algo semelhante à figura 8.

Para cada posição, o potenciômetro apresenta uma média de valores digitais. Por exemplo, quando o dedo mínimo (1) está estendido (posição A), seu respectivo potenciômetro apresenta valores em torno de 191. Quando esse dedo é totalmente flexionado (posição B) seus valores ficam em torno de 616.

Porteriormente, para diminuir o tamanho da mensagem a ser enviada, o valor digital apresentado pelo potenciômetro é remapeado para uma faixa de valores inteiros que representam posições inteiras entre 0 e 9. Quando os valores de todos os potenciômetros são remapeados, eles são concatenados em um único número de 5 dígitos, no qual cada dígito representa cada um dos cinco dedos da esquerda para a direita.

Por exemplo, em uma mensagem "69071" o dedo 1 (mínimo) está na posição 6, o dedo 2 (anelar) está na posição 9 e assim sucessivamente até o dedo 5 (polegar) que está

na posição 1.

3.3.2 VirtualWire

VirtualWire é uma biblioteca de comunicação para Arduino que possibilita vários Arduinos se comunicarem usando transmissores e receptores RF de baixo custo. Essa biblioteca permite o envio de mensagens curtas, sem endereçamento, retransmissão ou confirmação, como se fosse uma espécie de protocolo UDP (*User Datagram Protocol*), usando modulação ASK (*Amplitude Shift Keying*) (MCCAULEY, 2013).

O uso dessa biblioteca nos códigos da IDE do Arduino, permite abstrair tratamentos de envio e recebimento de dados tais como, sincronização de padrões, balanceamento de bits 0 e 1, e checagem de erros (PAUL, 2018). Dessa forma, para enviar e receber mensagens, basta seguir os padrões de entrada e saída das funções descritas na biblioteca.

No código embarcado no microcontrolador da luva foram definidos, segundo os parâmetros da biblioteca, o pino do transmissor RF, a taxa de transmissão e o tamanho da mensagem a ser enviada. Porém, antes de efetivamente enviar a mensagem é preciso convertê-la em uma string que logo em seguida será transformada em um vetor de char, que é o formato de dado aceito pela função de envio.

Uma das formas de converter valores inteiros em string é concatenar o valor inteiro com uma string (SM, 2018). Por isso, no código desenvolvido, uma string vazia é somada aos valores inteiros remapeados dos potenciômetros. Com isso, os valores serão concatenados e transformados em uma string ao mesmo tempo. Essa string então é transformada em um vetor de char usando a função "toCharArray" antes de ser enviada. Este processo está descrito resumidamente no pseudocódigo abaixo.

```
// Inicia variaveis
string vazia = ""
string mensagem = ""

// Recebe as posicoes de cada dedo
int dedo1 = posicao_dedo1;
int dedo2 = posicao_dedo2;
int dedo3 = posicao_dedo3;
int dedo4 = posicao_dedo4;
int dedo5 = posicao_dedo5;

// Concatena os inteiros e os transforma em string
mensagem = vazia + dedo1 + dedo2 + dedo3 + dedo4 + dedo5;

// Converte a string em um vetor de char
mensagem = mensagem.toCharArray();
```

```
// Envia o vetor de char
vw_send(mensagem);
```

3.4 Ajustes

3.4.1 Introdução

Quando os dedos estão em um mesmo grau de flexão, na grande maioria das vezes, os valores detectados para cada dedo são diferentes. Quando a luva está em posição A (extendida), por exemplo, o valor detectado no dedo mínimo (1) fica em torno de 192, enquanto que o anelar (2) apresenta, ao mesmo tempo, um valor em torno de 141.

Além do mais, devido à posição em que cada potenciômetro foi soldado na placa embarcada, alguns potênciômetros apresentam deslocamentos positivos ou negativos para um mesmo movimento.

3.4.2 Deslocamento e número de posições

Para descobrir os valores de deslocamento, cada potenciômetro teve seu valor digital anotado para as posições A e B, que posteriormente foram usados na equação 3.1:

$$\Delta Pos = PosB - PosA \quad (3.1)$$

Usando o módulo de ΔPos é possível calcular o número de posições detectáveis partindo da Posição A até a Posição B, através da equação 3.2:

$$NPos = |\Delta Pos| + 1 \quad (3.2)$$

A tabela 1 mostra os valores obtidos e calculados para cada um dos cinco potenciômetro no deslocamento da posição A para a posição B.

Tabela 1 – Valores de A para B

Dedo	PosA	PosB	ΔPos	NPos
1	191	616	+425	426
2	140	609	+469	470
3	774	360	-414	415
4	728	475	-253	254
5	670	367	-303	304

Fonte – Produzido pelo autor

Quanto maior for o valor de NPos na tabela 1, mais preciso será o sensoriamento do dedo. Sendo assim, o anelar (2) é o dedo com maior potencial de sensoriamento, enquanto que o indicador (4) possui menor potencial.

3.4.3 Remapeamento

Com o intuito de diminuir o tamanho da mensagem a ser enviada pelo transmissor de rádio frequência, foi definido que cada potenciômetro teria apenas 10 níveis de deslocamento representados durante a transmissão. Dessa forma, em uma mensagem numérica, bastaria 1 dígito para representar a posição atual do dedo.

Junto a isso, para diminuir a complexidade do protocolo de comando, foi decidido que não haveriam deslocamentos negativos. Algo que acontece nos dedos 3, 4 e 5 durante o deslocamento de A para B.

Para se adequar aos requisitos descritos, no código embarcado foi usada a função "map", que permite remapear uma faixa de valores em outra menor. Usando tal função, a faixa de entrada que inicialmente poderia variar entre 0 e 1023, foi remapeada para variar entre 0 e 9 valores inteiros.

Além do mais, a função map também permite inverter a saída, de uma forma que os valores de entrada que variam de 1023 a 0 (decrescente) passarão a variar de 0 a 9 (crescente). Este último requisito, permite eliminar os deslocamentos negativos.

Usando as equações 3.1 e 3.2, os valores digitais remapeados (R) foram adicionados à tabela 1, criando a tabela 2:

Tabela 2 – Valores de A para B e remapeados (R).

Dedo	PosA (RA)	PosB (RB)	Δ Pos (Δ R)	NPos (NR)
1	191 (1)	616 (5)	+425 (+4)	425 (5)
2	140 (1)	609 (5)	+469 (+4)	469 (5)
3	774 (3)	360 (6)	-414 (+3)	414 (4)
4	728 (3)	475 (5)	-253 (+2)	253 (3)
5	670 (4)	367 (6)	-303 (+2)	303 (3)

Fonte – Produzido pelo autor

3.5 Protocolo de comunicação

3.5.1 Introdução

Através de um transmissor de rádio frequência, a o sistema embarcado na luva envia constantemente mensagens de 5 dígitos que indicam a posição de cada um dos cinco

dedos. Para receber esse sinal, é preciso usar um módulo receptor de rádio frequência compatível com o transmissor.

Um sistema receptor foi embarcado em um carrinho usando um segundo microcontrolador Arduino modelo Nano e um módulo receptor RF. Esse carrinho funciona com motores DC (*Direct Current*) e todo o sistema é alimentado por uma bateria LiPo.

Para possibilitar o controle, conjuntos pré-definidos das posições dos dedos correspondem a movimentos que devem ser executados pelo carrinho.

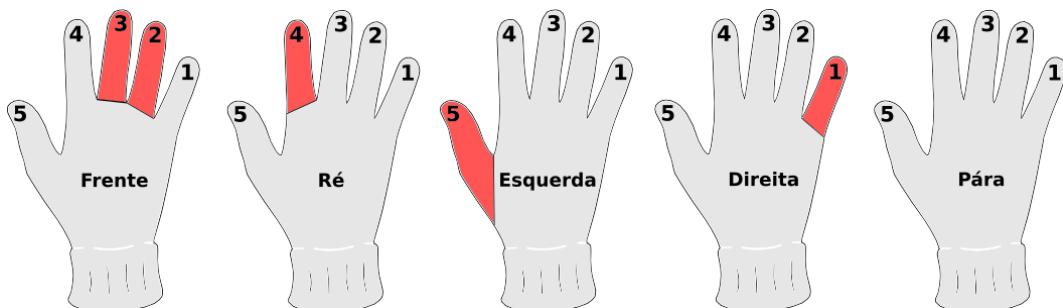
3.5.2 Posições e movimentos

Como foi explicitado anteriormente, a mensagem transmitida pela luva consiste em um conjunto de 5 dígitos no qual cada dígito indica a posição de um respectivo dedo. Na mensagem, o primeiro dígito da esquerda indica a posição do dedo 1, que é o dedo mínimo. O segundo dígito indica a posição do dedo 2, ou seja, o dedo anelar. Essa lógica segue até o quinto dígito que representa a posição do dedo polegar.

Cinco comandos foram definidos para o carrinho, ir para frente, ir para trás, girar para a esquerda, girar para a direita e parar. Com o intuito de controlar o carrinho através de combinações de flexões e extensões de dedos, 5 conjuntos de posições também foram definidas. São eles: flexionar os dedos 2 e 3 simultaneamente, flexionar somente o dedo 4, flexionar somente o dedo 5, flexionar apenas o dedo 1 e não flexionar nenhum dedo.

A figura 9 mostra a correspondência entre cada combinação de flexão dos dedos e seu respectivo comando para o carrinho. Apenas os dedos indicados em vermelho devem ser flexionados para validar o comando. Qualquer outra combinação faz o carrinho parar.

Figura 9 – Comandos a partir de flexões e extensões para controle do carrinho



Fonte – Produzido pelo autor.

3.5.3 Software de recepção

A biblioteca VirtualWire também deve estar presente no código do microcontrolador embarcado no carrinho. Para receber as mensagens adequadamente, é necessário definir o pino do receptor RF e indicar a taxa de transmissão do transmissor RF. Também deve-se

criar variáveis para guardar a mensagem recebida e o seu tamanho, pois as mensagens são recebidas *byte a byte*.

Uma função nativa da biblioteca verifica se chegou alguma mensagem e indica *true* quando isso acontece. Então, ao receber uma mensagem, para lê-la, é necessário criar um *for* que recebe como parâmetro o tamanho da mensagem recebida. Dentro da função a mensagem será lida *byte a byte* enquanto a função *for* for verdadeira.

O pseudocódigo abaixo demonstra o fluxo descrito:

```
// Define as variaveis
int pino_receptor = 8;
int taxa_transmissao = 2000;

// Recebe a mensagem e o seu tamanho
byte msg = get_mensagem;
byte tamanho_msg = get_tamanho_msg;

// Aguarda receber alguma mensagem
chegou_mensagem = vw_wait_rx();

// Verifica se ha mensagem, inicia o for para ler cada byte
if(chegou_mensagem){
    for (int i = 0; enquanto i < tamanho_msg; i++)
        byte_recebido[ i ] = msg[ i ];
}
```

Usando o pseudocódigo apresentado e sabendo que na mensagem recebida o primeiro dígito indica a posição atual do dedo 1, percebe-se que a função *for* irá rodar pelo menos 5 vezes, armazenando em cada posição do vetor *byte_recebido[]* as informações de cada dedo. Dessa maneira, a posição recebida do dedo 1 estará em *byte_recebido[0]*, enquanto que a do dedo 2 está em *byte_recebido[1]*. Continuando assim até o dedo 5 que estará em *byte_recebido[4]*.

Após o armazenamento das posições dos dedos, cinco funções foram criadas para comandar a ponte H e dessa forma movimentar os motores do carrinho. São elas: FRENT(), TRAS(), ESQUERDA(), DIREITA() e PARA(). Ao chamar qualquer uma dessas funções, o carrinho passa a se movimentar na direção e sentido definidas. Para chamar a função correta baseada na mensagem recebida, foram criadas cadeias de *Ifs* e *Elses* nas quais, quando satisfeitas certas condições, a respectiva função é chamada.

A tabela 3 mostra quais são os conjuntos de valores esperados para todos os dedos simultaneamente em cada comando. Ou seja, para saber qual a combinação de valores para movimentar o carrinho para frente, é só observar a coluna "Frente" da tabela. Qualquer outra combinação além das especificadas na tabela, fará o carrinho ficar parado. Os dedos

flexionados estão destacados em vermelho.

Tabela 3 – Valores recebidos dos dedos e comandos de movimento

Dedo	Frente	Tras	Esquerda	Direita	Para
1	< 2	< 2	< 2	> 1	-
2	> 1	< 2	< 2	< 2	-
3	> 3	< 4	< 4	< 4	-
4	< 4	> 3	< 4	< 4	-
5	< 5	< 5	> 4	< 5	-

Fonte – Produzido pelo autor

3.6 Montagem do protótipo

3.6.1 Transdutor de Flexão

A escolha de materiais foi baseada no menor custo e maior disponibilidade local. Prevendo a possibilidade de costuras no projeto, um par de luvas de algodão foi escolhida. O sistema foi embarcado na luva direita, enquanto que a esquerda poderia ser usada em caso de dano da primeira.

As polias plásticas são feitas a partir de pequenos pedaços de hastes flexíveis com algodão nas pontas. Sendo que apenas a parte plástica foi aproveitada enquanto que o algodão foi descartado.

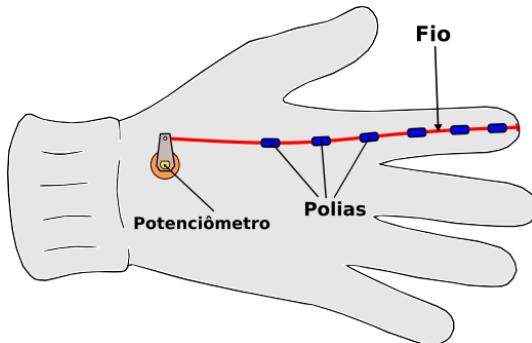
O material da linha que movimenta os cursores dos potenciômetro é náilon por sua boa resistência e durabilidade, além de aparentar ter pouca ou nenhuma elasticidade para a aplicação.

Utilizando a luva escolhida com o dorso voltado para cima, as polias plásticas foram costuradas ao longo dos dedos. Uma das extremidades de cada fio de náilon foi presa na ponta de cada um dos dedos, enquanto que o restante do fio passava por dentro das polias plásticas. A outra extremidade do fio de náilon seria amarrada ao cursor do potenciômetro quando a PCB fosse incluída na luva. A figura 10 demostra o resultado esperado para um dos dedos da luva.

3.6.2 Escolha de componentes

O sistema de processamento e transmissão de sinal embarcado na luva, foi projetado para ser móvel, leve, alimentado por uma bateria, caber no dorso da mão e ter custo relativamente menor em relação à soluções com sensores flex tradicionais. O sistema deve ser de fácil reprodução e o mais adaptável possível à outras formas de transmissão além da rádio frequência, caso estas sejam necessárias futuramente.

Figura 10 – Costura do transdutor em um dedo.



Fonte – Produzido pelo autor.

O primeiro desafio foi escolher, dentre os componentes disponíveis, quais seriam utilizados para compor a eletrônica presente na placa de circuito impresso que estaria embarcada na luva.

O potenciômetro foi o primeiro componente a ser definido. Isso porque, este seria o componente em maior número na placa. O modelo escolhido deveria ser pequeno suficiente para manter uma distância adequada para outros potenciômetros e componentes. Seu cursor deveria ser de fácil giro, para que pudesse ser acionado apenas pelo deslocamento do fio. Seu ângulo de giro total precisava ser mínimo, para que o menor grau de giro correspondesse à maior variação de resistência possível, facilitando assim a percepção pelo microcontrolador.

O modelo de potenciômetro que mais se aproximou das especificações acima foi retirado de servomotores modelo MG996R da marca TowerPro. O potenciômetro encontrado possui dimensão aproximada de $13\text{ mm} \times 13\text{ mm}$, resistência máxima de $5\text{ k}\Omega$, giro máximo de 200° (aproximado) e oferece pouca resistência para girar seu cursor.

Um pequeno pedaço de PVC (*Polyvinyl Chloride*) expandido foi adaptado ao cursor do potenciômetro para facilitar o seu giro, amarrar uma das extremidades do fio de náilon e para prender um elástico. Essa adaptação pode ser vista na figura 11.a.

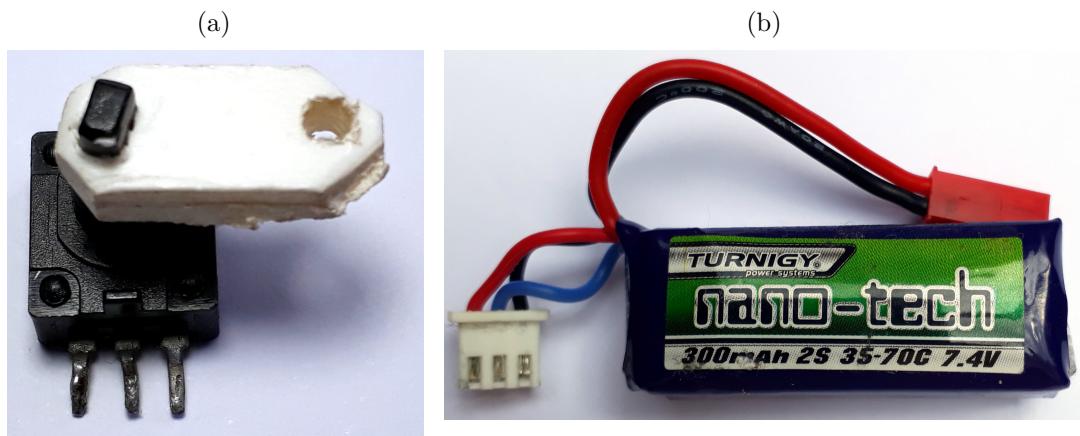
O microcontrolador escolhido para processar os dados recebidos de cada potenciômetro foi o Arduíno modelo Nano. Isso porque ele é leve, ocupa uma área de apenas $45\text{ mm} \times 17\text{ mm}$, possui vasta documentação e disponibilidade no mercado, além de ser compatível com diversos módulos externos e possuir custo menor do que outros modelos da família Arduino.

Para transmitir e receber o sinal, foi escolhido o par de RF 433 MHz , que é leve e de baixo custo comparado à outras soluções de transmissão de dados.

Finalmente, para alimentar esse aparato eletrônico, foi escolhida uma pequena bateria LiPo (*Lithium-ion Polymer*) que possui capacidade de 300 mAh , $7,4\text{ V}$ de tensão

nominal e ocupa um espaço de $45\text{ mm} \times 12,5\text{ mm}$. Esse modelo é mostrado na figura 11.b.

Figura 11 – (a) Potenciômetro adaptado e (b) bateria.

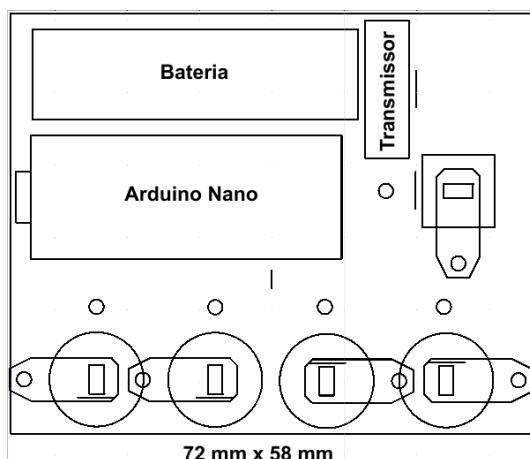


Fonte – Produzido pelo autor.

3.6.3 Posicionamento de componentes

Após medições realizadas na luva que serviu de modelo para o projeto, foi decidido que a dimensão máxima da PCI (Placa de Circuito Impresso) deveria ser de aproximadamente $72\text{ mm} \times 58\text{ mm}$, para que a placa não ficasse muito maior do que o dorso da luva. Sendo assim, usando o software QCAD, todos os componentes foram organizados dentro da placa basando-se nas suas dimensões aproximadas. O *layout* final da placa é apresentado na figura 12.

Figura 12 – Dimensões aproximadas da PCI e seus componentes.



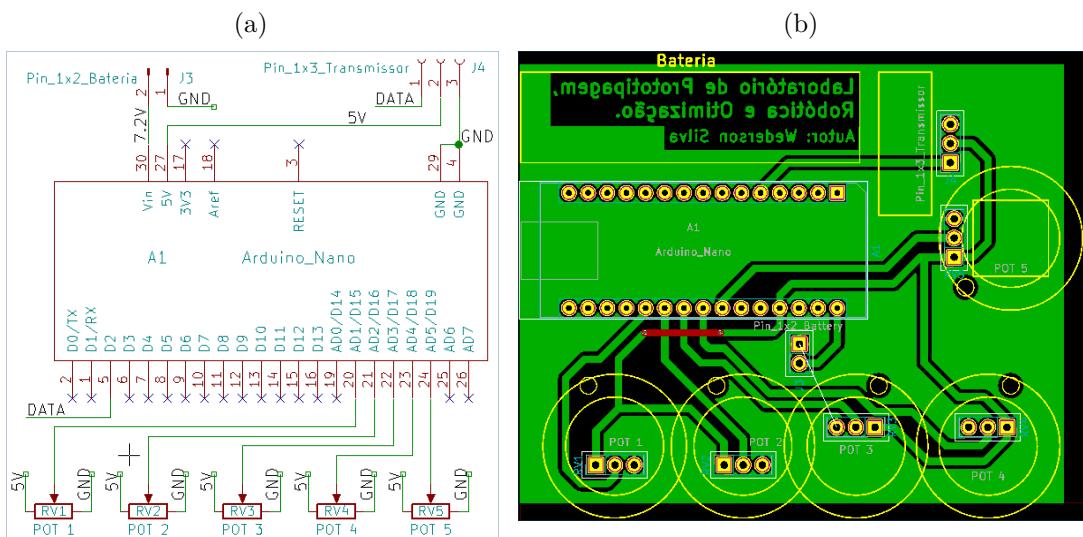
Fonte – Produzido pelo autor.

3.6.4 Placa Embarcada

Os primeiros experimentos de comportamento e ligação entre os componentes foram realizados ainda em protoboard. Inicialmente, um programa lia a variação de um resistor e mostrava na tela do computador. Este e outros programas foram usados para verificar como deveriam ser as conexões entre os pinos, potenciômetros, bateria, módulo transmissor e o microcontrolador Arduíno.

O passo seguinte foi utilizar o software gratuito Kicad para desenhar o esquemático da placa. Posteriormente, o Kicad ainda possibilita projetar uma placa de circuito impresso baseada no esquemático desenhado anteriormente. Através desse software foram criados os desenhos do esquemático e da PCI embarcada mostrados na figura 13.

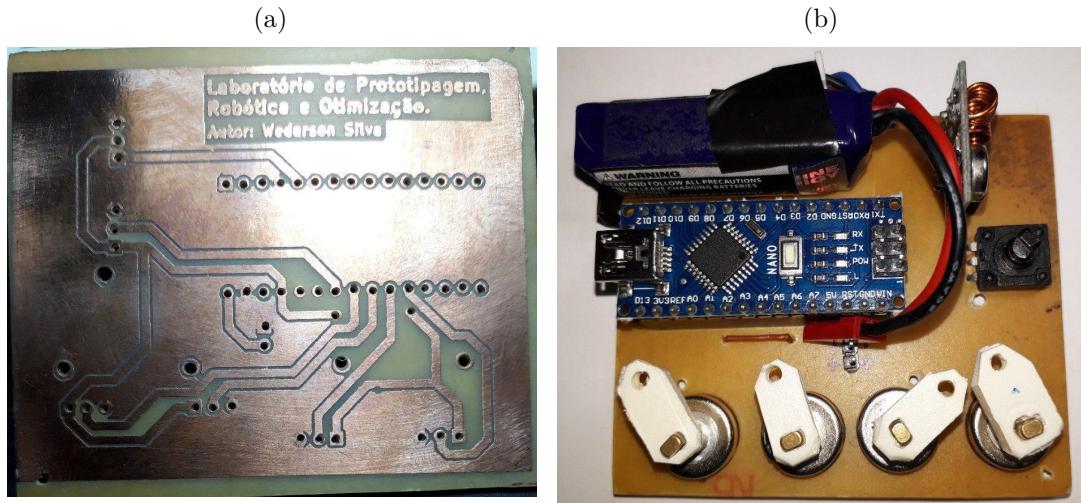
Figura 13 – Desenhos projetados no Kicad do (a) esquemático e (b) PCI.



Fonte – Produzido pelo autor.

Após a conclusão do desenho da placa, foram efetuados os procedimentos necessários para a confecção desta PCI em uma placa de fenolite cobreada, além da posterior soldagem de pinos e componentes. A figura 14 mostra os resultados após o procedimento descrito. Já a figura 15 mostra o resultado final após juntar a luva de algodão e a placa de circuito impresso recém concluída.

Figura 14 – (a) Placa de fenolite cobreada e (b) com os componentes soldados.



Fonte – Produzido pelo autor.

Figura 15 – Luva montada.



Fonte – Produzido pelo autor.

4 Resultados e análises

4.1 Introdução

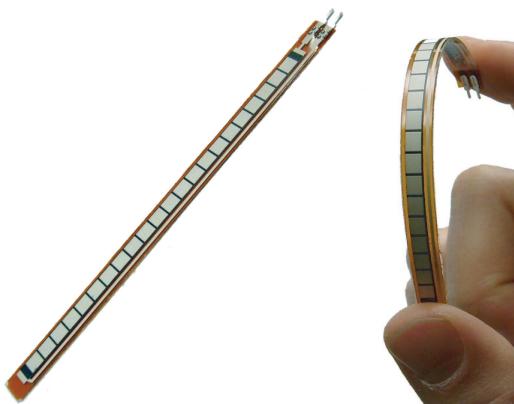
O capítulo a seguir realiza diferentes testes com o sistema bioinspirado desenvolvido e os compara com outros trabalhos semelhantes. As três frentes a serem analisadas são: a sensibilidade do sensor de flexão, a duração do sistema alimentado por bateria e o alcance de transmissão do sinal.

4.2 Sensibilidade

O primeiro teste a ser realizado foi o teste de sensibilidade do sistema. Sendo este um sensor de flexão, faz-se necessário mensurar a quantidade máxima de posições capturadas em um movimento. Diversos trabalhos utilizam sensores flex comerciais para realizar a captura de movimentos. O desempenho de um desses trabalhos foi utilizado como referência.

Os sensores de flexão comerciais, mais conhecidos como sensores flex, são resistores analógicos. Dentro desses sensores existem elementos resistivos de carbono junto a um fino substrato flexível. Quando o substrato é torcido o sensor produz uma resistência relativa ao raio da torção. Quanto maior o raio de torção maior será a resistência apresentada pelo sensor (M, 2013). A figura 16 mostra um sensor flex da fabricante Spectra Symbol.

Figura 16 – Sensor de Flexão.

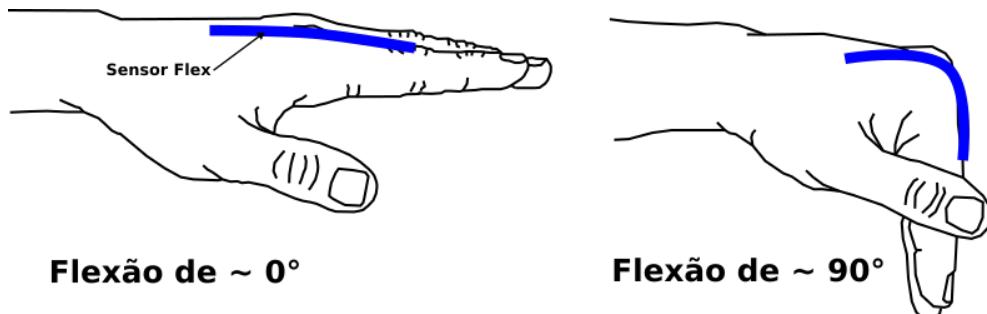


Fonte – (CORP, 2014).

A figura 17 demonstra uso do sensor flex comercial em um dos pontos de flexão do dedo. A figura também mostra o que seriam os graus de torção do sensor. À esquerda estão a mão e o sensor (em azul), em posição inicial, ambos com ângulo de flexão de

aproximadamente 0 (zero) grau. À direita está o resultado de um movimento de flexão de aproximadamente 90 graus em relação à posição anterior.

Figura 17 – Sensor flex comercial na mão durante a flexão.



Fonte – Produzido pelo autor.

O trabalho de (RAJAMOHAN; R.; M., 2013), que será utilizado como referência, utiliza sensores flex comerciais de 2,5 e 4,5 polegadas instalados em uma luva, com o propósito de criar um interpretador da linguagem americana de sinais. Os gestos traduzidos são transformados em palavras que são exibidas em uma pequena tela de LCD.

O autor cita que durante os testes, os sensores flex de 2,5 polegadas foram instalados nos dedos mínimo e polegar, enquanto que os sensores de 4,5 polegadas foram instalados nos dedos indicador, médio e anelar. Ele apresenta uma tabela de valores obtidos por cada sensor nas posições de flexão de 0 graus e 90 graus.

Os valores digitais obtidos nas posições de flexão de 0 grau e 90 graus, de ambos os trabalhos, foram utilizados para calcular, de acordo com as equações 3.1 e 3.2, o número de posições possíveis captadas entre 0 e 90 graus. Sendo que, para este cálculo, PosB recebe o valor digital em 90 graus e PosA recebe o valor digital recebido em 0 grau.

A tabela 4 mostra os valores obtidos em 0 grau (Pos0), 90 graus (Pos90) e o número de posições possíveis (NPos) calculados. As duas colunas da esquerda são referentes ao sensor flex comercial e as demais são referentes aos dedos do sensor bioinspirado. O dedo polegar não está presente na tabela porque ele não é flexionado durante o movimento realizado neste teste.

Tabela 4 – Valores obtidos e número de posições entre 0 e 90 graus.

Posições	2,5”	4,5”	Mínimo	Anelar	Médio	Indicador
Pos0	748	350	206	142	771	746
Pos90	875	568	309	396	527	607
NPos	128	219	104	255	245	140

Fonte – Adaptado de (RAJAMOHAN; R.; M., 2013) e produzido pelo autor.

Através da tabela 4 é possível notar que o maior número de posições detectáveis neste teste é do dedo anelar do sensor bioinspirado, já o menor é do dedo mínimo. O sensor flex comercial de 4,5 polegadas apresenta desempenho superior aos dedos indicador e mínimo do sensor bioinspirado, já o modelo comercial de 2,5 polegadas, apresenta baixo desempenho, sendo superior apenas ao dedo mínimo.

No desempenho geral, vemos que usando o sensor bioinspirado produzido, conseguimos captar um número superior de posições de flexão nos dedos anelar e médio, em comparação ao sensor flex de 4,5 polegadas. Em comparação com modelo de 2,5 polegadas, o sensor bioinspirado se sai melhor em 3 dos 4 dedos.

Dessa forma é possível afirmar que, neste teste, o sensor bioinspirado conseguiu desempenho equiparado a um sensor comercial. Sendo que um sensor flex comercial possui um custo relativamente superior.

4.3 Bateria

A mobilidade é um dos requisitos do projeto desenvolvido. Por conta desse fato, a alimentação da luva é feita por uma pequena bateria LiPo. Outros projetos de luvas móveis também usam baterias ou até mesmo pilhas. O desempenho de cada projeto varia de acordo com o hardware implementado e a capacidade da fonte de alimentação. Nessa seção, o desempenho da bateria da luva produzida será comparado ao de outros projetos.

A luva comercial Data Glove 5 Ultra da fabricante 5DT Inc. possui sensores de flexão baseados em fibra óptica. Esse produto pode ser utilizado para modelagem 3D e animação em programas de computador. Utiliza tecnologia de comunicação sem fio Bluetooth e seu datasheet afirma um desempenho da bateria recarregável aproximado de 8 horas (INC., 2004). Por ser um produto fechado, as características de sua bateria não são conhecidas.

O trabalho de (BORGHETTI; SARDINI; SERPELLONI, 2013) busca, através de uma luva sensorizada, mensurar a flexão dos dedos para estudos de reabilitação. A luva é embarcada com sensores flex comerciais, um microcontrolador e um transmissor de rádio frequência. Toda a eletrônica é alimentada por uma bateria em formato de botão com tensão nominal de 3 V e capacidade de 1000 mAh. Obteve desempenho aproximado de uma semana.

Uma luva de baixo custo foi desenvolvida por (SIMONE et al., 2007) com o propósito de monitorar a flexão dos dedos de pessoas com disfunções na mão. A unidade possui sensores de flexão e uma placa embarcada com um microprocessador, uma memória RAM externa, um transmissor de sinal padrão IEEE 802.15.4 e pilhas AA alcalinas. A capacidade dessas pilhas não foi definida no trabalho, porém (BUCHMANN, 2016) cita

que esse tipo de pilha possui capacidade de até 2870 mAh cada. Usando duas pilhas novas durante os testes, o sistema conseguiu ser alimentado por quase 60 horas.

A luva bioinspirada desse trabalho está equipada com cinco potenciômetros, um microcontrolador Arduino, um transmissor de rádio frequência 433 MHz e uma bateria LiPo com tensão nominal de 7,4 V e capacidade de 300 mAh. Essa bateria, apesar de possuir tensão nominal de 7,4 V, consegue alcançar uma tensão de até 8,4 V quando está totalmente carregada (BUCHMANN, 2016).

É recomendado alimentar o Arduíno Nano com tensões entre 7 V e 12 V (LICENSE, 2019), portanto, a luva funciona como esperado até o momento em que a tensão da bateria descarrega no limite de 7 V. Em caso de uso contínuo a partir desse valor, o microcontrolador passa a reiniciar constantemente impossibilitando seu uso até que a bateria seja recarregada ou substituída.

Para realizar o teste de desempenho da bateria, um módulo receptor junto a um Arduino foram conectados a um computador. Uma bateria recém carregada completamente, foi conectada à luva e o momento inicial foi marcado. O sistema transmissor da luva ficou ligado enviando sinais continuamente. Durante o teste, a tensão da bateria foi monitorada em intervalos regulares. Após um período de aproximadamente 10 horas a tensão da bateria chegou ao limite definido de 7 V e o teste foi encerrado.

A tabela 5 resume o desempenho dos dispositivos explicitados nesta seção.

Tabela 5 – Desempenho de alimentação das luvas

Luva	Alimentação	Capacidade	Duração
Data Glove 5	Não definida	Não definida	8 horas
Luva sensorizada	1 bateria-botão	1000 mAh	1 semana
Luva de baixo custo	2 pilhas AA	5740 mAh	60 horas
BioGlove	1 LiPo 7,4 V	300 mAh	10 horas

Fonte – Produzido pelo autor.

Analizando a tabela 5 percebe-se que a luva sensorizada possui o melhor desempenho, isso pode ser atribuído ao hardware de baixo consumo de energia e ao número reduzido de componentes do projeto (BORGHETTI; SARDINI; SERPELLONI, 2013). A luva de baixo custo desenvolvida em (SIMONE et al., 2007) também apresenta um desempenho excepcional, isto pode ser atribuído pela alta capacidade fornecida através de suas 2 pilhas alcalinas.

A luva Data Glove 5, apesar de ser um produto comercial, possui o pior desempenho dentre todos os analisados, o hardware fechado dificulta a análise para além da duração de sua bateria. Porém, deve-se notar que esta luva apresenta diversos recursos de uso

como calibração, compatibilidade com diversos sistemas operacionais e softwares (INC., 2004). Portanto, seu consumo de energia elevado pode ser caracterizado pela provável complexidade do hardware deste produto.

O segundo pior desempenho foi obtido pela BioGlove. Sua alimentação de baixa capacidade, o uso de uma placa comercial recheada de componentes e o envio constante de mensagens através de seu módulo transmissor podem ser as principais causas desse curto período de duração apresentado. Entretanto, pelo fato de a placa embarcada usar um Arduíno, este pode ser alimentado via cabo USB. Para aplicações que exigam um maior período de funcionamento ininterrupto, o uso do cabo USB poderia ser uma opção viável.

4.4 Alcance

Em um projeto móvel, o alcance do transmissor em relação ao receptor é limitado pela tecnologia empregada nesses equipamentos. Hardwares com maior potência alcançam maiores distâncias, entretanto tem custo mais elevado. Existem tecnologias de transmissão de baixo custo, como a que foi empregada nesse projeto, porém com alcance menor.

Dentre as diversas opções, há projetos que utilizam transmissão via bluetooth, que permite interação com computadores, smartphones ou qualquer outro dispositivo compatível que esteja próximo. Outros projetos chegam a usar a tecnologia de rede Wi-Fi e com isso são capazes de enviar comandos através da internet, podendo interagir com qualquer dispositivo conectado à grande rede mundial.

Na seção a seguir, o alcance de projetos de luvas que utilizam a tecnologia Bluetooth serão comparados ao método de transmissão via rádio frequência utilizado na luva bioinspirada produzida.

O datasheet da luva comercial Data Glove 5 Utra oferece também informações sobre sua tecnologia de transmissão. Nele está especificado que atrelado à luva há um kit de transmissão sem fio, no qual suporta até duas luvas simultaneamente. A tecnologia de transmissão Bluetooth utilizada, trabalha na faixa de 2,4 GHz e consegue um alcance de até 20 metros (INC., 2004).

PERCRO Dataglove é uma luva baseada no funcionamento de goniômetros, que são instrumentos responsáveis por medir o deslocamento angular relativo. Desenvolvida no trabalho de (RODRIGUEZ et al., 2007), possui dois sensores em cada dedo, um microcontrolador embarcado e um módulo Bluetooth 2,4 GHz que chega a alcançar uma comunicação satisfatória de até 10 metros.

A BioGlove está equipada com um par de módulos de transmissão e recepção de rádio frequência que trabalham na faixa de 433 MHz. De acordo com o manual da biblioteca que auxilia o uso desse equipamento, usando uma antena de 17 cm em ambos os

módulos, o alcance pode ser de até 150 metros em campo aberto (MCCAULEY, 2013). Entretanto, por conta da fragilidade dos módulos, foi possível soldar apenas uma antena no transmissor.

Durante os testes de alcance de transmissão, o módulo receptor foi conectado a um computador que ficou fixo em um local. O transmissor embarcado na luva foi sendo distanciado aos poucos enquanto que a resposta do receptor era constantemente verificada. Por volta de 7,5 metros a resposta do transmissor começou a falhar e o teste foi encerrado nesta marca. A tabela 6 resume o desempenho de alcance apresentado pelas três luvas.

Tabela 6 – Desempenho de alcance das luvas

Luva	Tecnologia	Faixa	Alcance
Data Glove 5	Bluetooth	2,4 GHz	20 metros
PERCRO Dataglove	Bluetooth	2,4 GHz	10 metros
BioGlove	Rádio Frequência	433 MHz	7,5 metros

Fonte – Produzido pelo autor.

Observa-se pela tabela 6 que apesar de duas luvas usarem a mesma tecnologia, apresentam resultados diferentes. Isso pode ser atribuído à diferentes versões dos módulos ou à potência empregada neles. A luva comercial mostrou possuir o melhor desempenho chegando a ter o dobro do alcance útil em relação à segunda colocada.

O pior desempenho ficou por conta da BioGlove, esta que emprega uma tecnologia de comunicação mais barata, apresentando desempenho muito inferior ao indicado no manual. Apesar disso, conseguiu um alcance relativamente próximo ao da PERCRO Dataglove. Além disso, deve ser lembrado que o módulo receptor da BioGlove não recebeu uma antena, o que poderia potencializar o alcance de comunicação do par.

5 Conclusão

Este trabalho se mostrou viável em comparação à outras soluções semelhantes, mesmo frente à um produto comercial. Em 2 dos 3 aspectos pesquisados, a BioGlove conseguiu se equiparar à outros projetos. O principal ponto de pesquisa da luva, o sensoriamento de flexão, em alguns momentos chegou até mesmo a ser superior ao sensor flex comercial amplamente utilizado em diversos projetos.

Sua bateria de baixa capacidade apresentou um desempenho relativamente curto durante o uso ininterrupto, porém, quando comparado à um produto comercial completo, conseguiu durar ligeiramente por mais tempo. O alcance de transmissão da BioGlove foi o aspecto com pior desempenho, frente à tecnologia Bluetooth utilizada em outras luvas.

Após a análise dos resultados que se apresentaram menos animadores, é possível perceber que pequenas mudanças podem influenciar na melhoria do desempenho em futuros testes. A vida útil da luva pode ser melhorado pelo uso de uma bateria mais potente e pelo aperfeiçoamento da frequência da transmissão de mensagens, enviar apenas quando for necessário, e não a todo momento como acontece atualmente. A inclusão de antenas melhores em ambos os módulos de rádio frequencia ou a troca da tecnologia de transmissão, por Bluetooth por exemplo, pode garantir uma melhoria no alcance de transmissão.

Os maiores desafios se apresentaram durante a escolha de componentes e montagem da luva. Não havendo muitas referências de trabalhos com mecânica semelhante, durante a montagem, os problemas inesperados foram sendo resolvidos com uso de componentes e ferramentas disponíveis no momento, mesmo que esses não fossem os ideais. Portanto, a troca de componentes por outros mais precisos, menores e que consumam menos energia, podem garantir maior estabilidade à luva.

O protocolo de comunicação criado, mesmo sendo simples, conseguiu chegar satisfatoriamente ao seu objetivo inicial de controlar os movimentos do carrinho, tendo a possibilidade até mesmo ser aproveitado para outras aplicações de controle. Entretanto, para aplicações que exijam uma demanda maior transmissão de dados, e não apenas 5 *bytes* por mensagem, será necessária uma melhoria no protocolo ou até mesmo a substituição do mesmo.

Este protótipo foi desenvolvido, usado e testado por apenas uma pessoa, o uso da luva por outras pessoas pode apresentar resultados diferentes e necessitar de ajustes. Cada pessoa possui características diferentes em suas mãos, dedos maiores ou menores, mão mais larga ou mais fina, diferentes graus de flexão dos dedos, entre outros. Portanto, a inclusão de uma função de calibração no software é necessária e pode diminuir tais contratemplos quando a BioGlove for utilizada por outros indivíduos.

Apesar de no geral o projeto desenvolvido se mostrar viável para ser uma luva de aferição de movimentos e transmissão de dados, este possui natureza diferente de outros produtos semelhantes. Enquanto que o uso de sensores flex pode trazer uma mecânica relativamente estável durante os movimentos, a BioGlove é dependente de uma rede de fios e polias que não apresentou muita estabilidade mecânica em uma luva de algodão. A troca do material da luva por um mais rígido, poderia favorecer a estabilidade durante os movimentos.

Com tudo, a BioGlove, mesmo apresentando limitações, se mostra capaz de fomentar projetos de baixo custo que necessitem desse tipo de equipamento. O uso de componentes de baixo custo, como potenciômetros e o par RF, além da amplamente conhecida e documentada placa Arduíno, permite com os devidos ajustes, que diversos módulos compatíveis sejam adicionados ao projeto. Com isso há a possibilidade de desenvolver soluções mais complexas, como a tradução da Linguagem Brasileira de Sinais (LIBRAS) de gestos para palavras ou até mesmo a interação com softwares de realidade virtual.

5.1 Trabalhos futuros

Dentre os possíveis trabalhos futuros relacionados à esse projeto estão:

- Investigar o uso de uma luva composta de material mais resistente do que o algodão.
- Usar um número maior de polias para guiar o fio utilizado.
- Investigar o uso de módulos com outras tecnologias de transmissão de dados.
- Trocar a bateria por outra de maior capacidade.
- Usar potenciômetros de menor tamanho e menor resistência elétrica.
- Substituir a placa Arduíno pelo uso apenas do microcontrolador ATmega.
- Criar uma função de calibração para uso da luva.
- Aumentar o número de *bytes* na mensagem transmitida.
- Modificar o software para enviar dados apenas quando for necessário.
- Diminuir o tamanho da PCI embarcada na luva.

Referências

- BORGHETTI, M.; SARDINI, E.; SERPELLONI, M. Sensorized glove for measuring hand finger flexion for rehabilitation purposes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 62, n. 12, p. 3308–3314, Dec 2013. ISSN 1557-9662. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6566034>>. Citado 5 vezes nas páginas 18, 21, 22, 39 e 40.
- BRAGA, N. C. *Curso de Eletrônica: Eletrônica Básica*. 1. ed. São Paulo - Brasil: Editora Newton C. Braga, 2012. v. 1. PAGES p. ISBN 8565050092, 9788565050098. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- BUCHMANN, I. *Batteries in a Portable World: A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*. Fourth. [S.l.]: Cadex Electronics Incorporated, 2016. 10–12 p. ISBN 9780968211847. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- BULLOCK, S. *Transceiver and System Design for Digital Communications*. Noble Publishing Corporation, 2017. ISBN 9781884932144. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=woWnJvaROXQC>>. Citado na página 22.
- Collins, S. H.; Ruina, A. A bipedal walking robot with efficient and human-like gait. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [s.n.], 2005. p. 1983–1988. ISSN 1050-4729. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1570404>>. Citado na página 15.
- COMPANIES, V. *About the VELCRO brand*. 2019. Acessado em: 05/04/2018. Disponível em: <<https://www.velcro.com/about-us/our-brand/>>. Citado na página 14.
- CORP, S. S. *DataSheet Flex Sensor Resistive*. 2014. Acessado em: 15/12/2018. Disponível em: <<http://www.spectrasymbol.com/wp-content/uploads/2016/12/FLEX-SENSOR-DATA-SHEET-v2014-Rev-A.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 37.
- DIGITAL, I. *Módulo RF Transmissor + Receptor 433mhz - Instituto Digital*. 2018. Acessado em: 12/08/2018. Disponível em: <<http://www.institutodigital.com.br/pdf-f7460-modulo-rf-transmissor-receptor-433mhz.html?ct=76b8b&p=4&s=1>>. Citado na página 22.
- FLORES, M. B. H.; SILOY, C. M. B.; OPPUS, C.; AGUSTIN, L. User-oriented finger-gesture glove controller with hand movement virtualization using flex sensors and a digital accelerometer. In: *2014 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. [s.n.], 2014. ISBN 978-1-4799-4020-2. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7016195>>. Citado na página 16.
- GARDNER, D. L. The power glove. In: *Design News: News for Design Engineers*. [s.n.], 1989. v. 45, n. 23, p. 63–68. Disponível em: <<https://www.microsoft.com/buxtoncollection/a/pdf/PowerGloveDesignNewsArticle.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 20 e 22.

- IN, H.; KANG, B. B.; SIN, M.; CHO, K.-J. Exo-glove: A wearable robot for the hand with a soft tendon routing system. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, v. 22, p. 97–105, Mar 2015. ISSN 1558-223X. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7059367>>. Citado na página 19.
- INC. eBay. *5DT Data Glove 5 Ultra Left and Right / eBay*. 2019. Acessado em: 08/05/2019. Disponível em: <<https://www.ebay.com/itm/5DT-Data-Glove-5-Ultra-Left-and-Right-/323249944201>>. Citado na página 16.
- INC., F. D. T. *5DT Data Glove Ultra Datasheet*. 2004. Acessado em: 05/01/2019. Disponível em: <<http://www.5dt.com/downloads/dataglove/ultra/5DTDataGloveUltraDatasheet.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 39 e 41.
- KUMAR, P.; VERMA, J.; PRASAD, S. Hand data glove: A wearable real-time device for human-computer interaction. *International Journal of Advanced Science and Technology*, v. 43, p. 15–26, Jun 2012. ISSN 2005-4238. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/f1ae/8066b654e5ccd2ae21c1e0bf32308c0361e9.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 22.
- LEE, D.; PARK, Y. Vision-based remote control system by motion detection and open finger counting. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, v. 55, n. 4, p. 2308–2313, Nov 2009. ISSN 1558-4127. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5373803>>. Citado na página 18.
- LICENSE, C. C. A.-S. . *Arduino - Introduction*. 2018. Acessado em: 12/08/2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Citado na página 21.
- LICENSE, C. C. A.-S. . *Arduino Nano - Tech Specs*. 2019. Acessado em: 06/01/2019. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>>. Citado na página 40.
- LIVINGSTONE, R. *The legacy of Greece*. Lulu.com, 2014. ISBN 9781291708516. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=YU9TBgAAQBAJ>>. Citado na página 14.
- LTDA., M. C. de Materiais Elétricos e S. *Sensor Flex 11,4 cm / Multilógica-Shop*. 2019. Acessado em: 07/01/2019. Disponível em: <<https://multilogica-shop.com/sensor-flex-114cm>>. Citado na página 17.
- M, S. K. Indian sign languages using flex sensor glove. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, v. 4, p. 2478–2480, 2013. ISSN 2231-5381. Disponível em: <<http://www.ijettjournal.org/volume-4/issue-6/IJETT-V4I6P149.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 22 e 37.
- MCCAULEY, M. *VirtualWire, Documentation for the VirtualWire communications library for Arduino*. [S.l.], 2013. V. 1.27. Disponível em: <<http://www.airspayce.com/mikem/arduino/VirtualWire.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 42.
- MOORE, K.; DALLEY, A.; AGUR, A. *Clinically Oriented Anatomy*. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2013. (Clinically Oriented Anatomy). ISBN 9781451119459. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-Le5bc5F0sYC>>. Citado na página 25.

- OLIVEIRA, R. K. de. *Dedo em Gatilho - Dr. Ricardo Kaempf - Cirurgia de Mão e Microcirurgia*. 2018. Acessado em: 07/08/2018. Disponível em: <<http://www.ricardokaempf.com.br/services/dedo-em-gatilho/>>. Citado na página 19.
- PAUL. *VirtualWire Library, for very cheap wireless communication*. 2018. Acessado em: 27/11/2018. Disponível em: <https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_VirtualWire.html>. Citado na página 27.
- PEREIRA, F. *MICROCONTROLADORES PIC - TECNICAS AVANÇADAS*. ERICA, 2002. ISBN 9788571947276. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=hqBUPgAACAAJ>>. Citado na página 21.
- PFEIFER, R.; LUNGARELLA, M.; LIDA, F. Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics. In: *Science*. [s.n.], 2007. v. 318, p. 1088–1093. ISSN 10.1126/science.1145803. Disponível em: <<http://science.sciencemag.org/content/318/5853/1088>>. Citado na página 14.
- PRUZANSKY, M. E.; PRUZANSKY, J. S. *Flexor Tendon Pulley System Injury - HandSport Surgery Institute*. 2018. Acessado em: 07/08/2018. Disponível em: <<https://handsport.us/patient-education/flexor-tendon-pulley-system-injury/>>. Citado na página 19.
- RAJAMOHAN, A.; R., H.; M., D. Deaf-mute communication interpreter. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, v. 2, p. 336–341, May 2013. ISSN 2277-1581. Disponível em: <<https://www.ijset.com/publication/v2/057.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 18, 20, 21 e 38.
- RODRIGUEZ, O. P.; AVIZZANO, C. A.; SOTGIU, E.; PABON, S.; FRISOLI, A.; ORTIZ, J.; BERGAMASCO, M. A wireless bluetooth dataglove based on a novel goniometric sensors. In: *RO-MAN 2007 - The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. [s.n.], 2007. p. 1185–1190. ISSN 1944-9437. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4415259>>. Citado na página 41.
- ROSHEIM, M. *Leonardo's Lost Robots*. Springer Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 9783540284406. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=64Ax_hfiXDIC>. Citado na página 14.
- SIMONE, L. K.; ELOVIC, E.; KALAMBUR, U.; KAMPER, D. A low cost method to measure finger flexion in individuals with reduced hand and finger range of motion. In: *The 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. [s.n.], 2004. p. 4791–4794. ISSN 0-7803-8439-3. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1404326>>. Citado na página 16.
- SIMONE, L. K.; SUNDARRAJAN, N.; LUO, X.; JIA, Y.; KAMPER, D. G. A low cost instrumented glove for extended monitoring and functional hand assessment. *Journal of Neuroscience Methods*, v. 160, p. 335–348, Mar 2007. ISSN 0165-0270. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165027006004754>>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- SM. *Arduino - String Addition Operator*. 2018. Acessado em: 04/12/2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/StringAdditionOperator>>. Citado na página 27.

SYED, A.; AGASBAL, Z. T. H.; MELLIGERI, T.; GUDUR, B. Flex sensor based robotic arm controller using micro controller. *Journal of Software Engineering and Applications*, v. 5, n. 5, p. 364–366, May 2012. ISSN 1945-3124. Disponível em: <https://file.scirp.org/pdf/JSEA2012050005_49971710.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 18 e 22.