



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Tomar

CyberGlove para Interação com Ambientes Imersivos

Projeto de Mestrado

Élio Leno da Costa Lopes

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica
Especialização em Controlo e Eletrónica Industrial

Tomar/ Novembro/ 2019



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Tomar

Élio Leno da Costa Lopes

CyberGlove para Interação com Ambientes Imersivos

Projeto de Mestrado

Orientado por:

Prof. Dr. Gabriel Pires - Instituto Politécnico de Tomar

Prof. Dr. Ana Lopes - Instituto Politécnico de Tomar

Projeto apresentado ao Instituto Politécnico de Tomar

para cumprimento dos requisitos necessários

à obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Electrotécnica – Especialização em Controlo e Eletrónica Industrial

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho para a minha mãe

RESUMO

Nos últimos anos, os sistemas de realidade virtual (RV) e mista evoluíram significativamente produzindo experiências imersivas surpreendentes. Ainda assim, a interação com o ambiente virtual não fornece o mesmo *feedback* que os utilizadores estão acostumados no mundo real.

Esta dissertação propõe uma luva para interação imersiva designada por CyberGlove-HT (Human Tracking) dos, fornecendo uma posição desacoplada do pulso e da mão, o que pode contribuir a uma incorporação melhor em tarefas da interação e de manipulação. Adicionalmente, a detecção da flexão/extensão dos dedos tem como objetivo melhorar a percepção proprioceptiva dos gestos de agarrar/libertar mais consistentes com o *feedback* visual.

A conceção da CyberGlove - HT compreende uma unidade de processamento, um módulo de comunicação Wi-Fi, sensores inerciais, sensores de flexão/extensão, sensores de força, sensor de batimento cardíaco e um vibromotor. A parte vestível da luva foi modelada em 3D e impressa em material flexível numa impressora 3D. Todos os circuitos eletrónicos foram criados para componentes SMD, minimizando o espaço necessário e assim permitindo uma luva vestível e leve. A CyberGlove - HT transmite em tempo real todos os dados sensoriais para o computador responsável pela renderização dos cenários e modelos 3D imersivos. A gestão de energia foi um aspeto chave, tendo-se conseguido uma autonomia de nove horas usando uma bateria de LiPo. Todos os sensores e o atuador foram validados experimentalmente de forma individual. A CyberGlove - HT foi depois testada como um todo através da realização de tarefas de interação num ambiente imersivo. Os resultados experimentais mostraram a eficácia do protótipo, contribuindo para uma maior sensação de imersão, incorporação e usabilidade quando comparado aos controladores de RV padrão do sistema HTC Vive. Os resultados deste trabalho foram publicados na conferência IEEE Systems, Man, and Cybernetics (SMC2019) [1].

Palavras-chave: Realidade Virtual, Imersão, Interatividade, CyberGlove - HT

ABSTRACT

In recent years, virtual and mixed reality systems have greatly evolved, producing amazing immersive experiences. Nevertheless, the interaction with the virtual environment does not give the same feedback as the users are used to in the real world.

This dissertation proposes an immersive interaction glove called CyberGlove - HT (Human Tracking), aiming to improve the degree of immersive sensation and embodiment in virtual and mixed reality interaction tasks. In particular, the CyberGlove - HT has been developed to track every wrist movement, hand orientation and finger movement, providing a decoupled wrist and hand position, which may contribute to a better embodiment in interaction and manipulation tasks. Additionally, finger flexion/extension detection aims to improve the proprioceptive perception of grasping/releasing gestures, more consistent with visual feedback.

The CyberGlove - HT design comprises a processing unit, a Wi-Fi communication module, inertial sensors, flex/extension sensors, strength sensors, heart rate sensor and a vibration motor. The wearable part of the glove was modeled in 3D and printed on a flexible material with a 3D printer. All electronic circuits were designed for SMD components, minimizing the required space, therefore allowing a wearable lightweight glove. The CyberGlove - HT transmits in real-time all sensory data to the computer responsible for rendering scenarios and immersive 3D models. Power management was a key aspect, and a 9h autonomy was achieved using a LiPo battery. All sensors and the actuator were experimentally validated individually. The CyberGlove - HT was then tested as a whole by performing interaction tasks in an immersive environment. The experimental results proved the prototype's effectiveness, contributing to a greater sense of immersion, embodiment and wearability, when compared to the standard VR controllers. The results of this work were published in the IEEE – Systems, Man and Cybernetics (SMC2019) conference [1].

Keywords: Virtual Reality, Immersion, Interactivity, CyberGlove.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não teria sido possível a sua realização e aos quais estarei eternamente grato.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Profs. Gabriel Pereira Pires e Ana Cristina Lopes por todo o apoio, dedicação, disponibilidade, ajuda prestada, conhecimento transmitido e principalmente agradecer-lhes pela liberdade e confiança que depositaram em mim, cedendo-me toda a autonomia necessário para a gestão do tempo e disponibilidade para evoluir neste projeto.

Gostaria de agradecer o apoio prestado, a vontade de ajudar, a disponibilidade e a boa disposição daqueles que foram meus colegas no projeto Rodolfo Martins e Beril Yalçinkaya.

Aos colegas e professores de curso pelo conhecimento e motivação que me transmitiram ao longo de todo o percurso académico. Um agradecimento especial ao Eng. Pedro Neves pela disponibilidade e apoio às questões e dúvidas e orientação no desenvolvimento do desenho e impressão da CyberGlove - HT e ao Eng. Luís Almeida pelo apoio e explicações acerca de sistemas de tracking da HTC Vive.

Não podia deixar de agradecer também os recursos e condições oferecidos pelo Lab. VITA.IPT – Vida Assistida por Ambientes Inteligentes e pelo Instituto Politécnico de Tomar.

Por último agradeço à minha família, em especial a minha mãe, irmã e a namorada por todo o apoio incondicional e por estarem sempre a meu lado com palavras de motivação e encorajamento desde o início à conclusão desta jornada.

Este trabalho foi feito no âmbito do projeto I&DT em Copromoção HTPDIR - HUMAN TRACKING AND PERCEPTION IN DYNAMIC IMMERSIVE ROOMS, POCI-01-0247-FEDER-017644, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI)

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XXIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XXV
1 Introdução	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Implementações e contribuições chave	4
1.4 Estrutura do Relatório	5
2 Estado da Arte.....	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Biomecânica da Mão.....	8
2.3 Realidade virtual.....	9
2.4 Luvas para realidade virtual	10
2.4.1 CyberGlove III.....	11
2.4.2 5DT Data Glove.....	11
2.4.3 MoCap Pro Glove	12
2.4.4 IGS Glove.....	12
2.4.5 Manus VR (Prime One)	13
2.4.6 Avatar VR	13
2.5 Conclusão	16
3 Tecnologias e Ambientes de Desenvolvimento.....	17
3.1 Sensores Inerciais	17
3.1.1 Sensor BNO055.....	18

3.2	Sensor Piezoresistivo	19
3.2.1	Flex Sensor	19
3.3	Sensor Splay	20
3.4	Sensores de força flexíveis	21
3.5	Sensores de batimento cardíaco.....	21
3.5.1	Módulo MAX30105	23
3.5.2	Comprimento de onda da luz.....	24
3.5.3	Gama típica de batimentos cardíacos.....	24
3.6	Sensores de distância	25
3.6.1	Módulo VL53L0X	26
3.7	Módulo de processamento e comunicação: ESP8266	26
3.8	SDKs de desenvolvimento de software para ESP8266.....	27
3.9	Ambientes de desenvolvimento gráfico e de renderização	28
3.9.1	Processing	28
3.9.2	Unity	29
3.10	Software de modelação 3D para impressão 3D	29
3.11	Modelação de circuito impresso em Eagle 9.5.1	30
3.12	Sistema de localização absoluta 3D do sistema HTC Vive	30
4	CyberGlove - HT	31
4.1	Setup da sala de realidade imersiva	31
4.2	Arquitetura da CyberGlove - HT.....	33
4.3	Modulo ESP8266-07.....	35
4.4	Módulo BNO055	39
4.4.1	Modo de operação.....	41
4.4.2	Modos de energia.....	42
4.4.3	Modo de Fusão	44

4.4.4	Calibração	44
4.5	Flex Sensor	47
4.6	Feedback háptico através de um vibro-motor	47
4.7	Sensor de força: FSR402.....	48
4.8	Medição de distâncias: sensor VL53L0X	49
4.9	MAX30105.....	50
4.10	Multiplexagem dos sensores analógicos	52
4.11	Bateria e circuito de gestão da bateria	53
4.12	Comunicação CyberGlove - HT-Unity	54
4.13	Modelação 3D da CyberGlove - HT	56
4.14	Modos de funcionamento da CyberGlove - HT.....	57
4.15	Circuito impresso PCB para componentes SMD	57
4.16	Tracker 3D.....	58
5	Resultados.....	59
5.1	Protótipos desenvolvidos	59
5.1.1	Protótipo 1 (inicial).....	59
5.1.2	Protótipo 2.....	59
5.1.3	Protótipo 3.....	60
5.1.4	Protótipo 4.....	61
5.2	Placas de Circuito Impresso	62
5.3	Testes de validação dos sensores da CyberGlove - HT	63
5.3.1	Dados inerciais: sensor BNO055.....	63
5.3.2	Sensor de curvatura.....	64
5.3.3	Sensor de batimento cardíaco: MAX30105	64
5.3.4	Sensor de distância	65
5.3.5	Sensor de força	66

5.4	Testes de consumo e tempo de duração da bateria	66
5.5	Testes experimentais do sistema global num contexto de realidade imersiva	68
5.5.1	Participantes	69
5.5.2	Design da Experiência	69
5.5.3	Procedimento experimental.....	71
5.5.4	Avaliação das medidas.....	71
5.5.5	Resultados	72
5.5.6	Discussão.....	75
6	Conclusão	77
	Referências bibliográficas	79
	ANEXOS.....	83
A.	Boards dos circuitos no Eagle	83
B.	Modulação 3D da CyberGlove - HT	84
C.	Sistema de rastreamento da HTC VIVE.....	85
I.	Lighthouse	85
II.	O dispositivo rastreado	86
III.	Processamento do sinal da Lighthouse.....	87
IV.	Cálculo de posição e orientação	90
D.	Tracker desenvolvido	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Cenário da sala de realidade imersiva (Adaptado de [2])	3
Figura 2 - Arquitetura global do protótipo da CyberGlove - HT.	5
Figura 3 - Representação óssea da mão esquerda humana (retirado de [5])	8
Figura 4 - Articulações e graus de movimento do dedo indicador (retirado de [6])	8
Figura 5 - Sayre Glove (retirado de [9]).....	10
Figura 6 - CyberGlove III (retirado de [10])	11
Figura 7 - a) Data Glove 5 Ultra; b) Data Glove 14 Ultra (adaptado de [11])	12
Figura 8 - MoCap Pro Glove (Retirado de [12])	12
Figura 9 - a) IGS Glove; Disposição dos sensores: b) sete sensores, c) doze sensores e d) quinze sensores (retirado de [11]).....	13
Figura 10 - Manus VR (Prime One retirado de [14]).....	13
Figura 11 - Avatar VR (retirado de [16])	14
Figura 12 - Arquitetura do BNO055 / IMU-BNO055	19
Figura 13 - Flex sensor 2.2 (retirado de [28])	20
Figura 14 - Sensor Splay (retirado de [29]).....	20
Figura 15 - FSR 402 (retirado de [31])	21
Figura 16 - O princípio das reflexivas óticas do pulso	22
Figura 17 - Gráfico do sinal PPG	22
Figura 18 - MAX30105.....	23
Figura 19 - Absorção de sangue humano (oxiemoglobina, HbO ₂ e hemoglobina, Hb) vs. Comprimento de onda da luz. Resposta espectral do foto-díodo (PD) e os espectros de emissão normalizados dos LEDs.	24
Figura 20 - VL53L0X	26
Figura 21 - ESP8266-07.....	28
Figura 22 - Ambiente de programação Processing	28
Figura 23 - Impressora Sigma BCN3D	30
Figura 24 - Cenário da sala de realidade imersiva.....	32
Figura 25 - Equipamentos de realidade imersiva, tracking e comunicação utilizados.	32
Figura 26 - Protótipo CyberGlove - HT.....	34

Figura 27 - Arquitetura da CyberGlove - HT e módulos funcionais do Unity.....	35
Figura 28 - Esquemático do Módulo WiFi ESP8266-07	36
Figura 29 - Modo de funcionamento normal.....	36
Figura 30 - Modo de programação	37
Figura 31 - Esquemático do Circuito da PCB da CyberGlove - HT (parte localizada na mão).	38
Figura 32 - Esquemático do Circuito PCB da CyberGlove - HT (parte localizada no pulso).	39
Figura 33 - Código de leitura dos dados inerciais recebidos no ESP8266 através do barramento I2C.....	40
Figura 34 - Ligações do BNO055.....	40
Figura 35 - Accel; Gyro; Magnet.....	42
Figura 36 - Fluxograma da Calibração do BNO055.....	46
Figura 37 - a) Posicionamento do sensor flexível; b) Fluxograma do cálculo do ângulo da curvatura dos dedos.....	47
Figura 38 - vibro-motor.....	48
Figura 39 - Posicionamento dos sensores FSR 402 na CyberGlove - HT	49
Figura 40 - Alcance e precisão do VL53L0X por defeito.....	50
Figura 41 - Leitura do batimento cardíaco	51
Figura 42 - Ligações do multiplexor analógico	53
Figura 43 - Bateria LiPo.....	53
Figura 44 - Circuito de carregamento da bateria	54
Figura 45 - Parâmetros para configuração da ESP8266-07	55
Figura 46 - Configuração da ESP8266-07 como servidor station	55
Figura 47 - Fluxograma do programa principal.....	56
Figura 48 - Desenho da CyberGlove - HT no SolidWorks; a) CyberGlove - HT da mão esquerda; b) CyberGlove - HT da mão direita	57
Figura 49 - Bracelete WristMov (Protótipo 1)	59
Figura 50 - CyberGlove - HT V01.....	60
Figura 51 - CyberGlove - HT V02.....	61
Figura 52 - CyberGlove - HT V03.....	62
Figura 53 - PCBs finais	63

Figura 54 - Versão final das PCBs com os todos os componentes.....	63
Figura 55 - Teste da orientação da mão	64
Figura 56 - Teste da posição dos dedos	64
Figura 57 - Comparação do Sensor MAX30105 e MySignals na medição do BPM	65
Figura 58 - Testes do sensor MAX30105 em contexto experimental.	65
Figura 59 - LTC4150	66
Figura 60 - Circuito de medição do consumo da CyberGlove - HT.....	67
Figura 61 - Valores medidos da bateria através da LTC4150	68
Figura 62 - Passos para abrir a porta no ambiente imersivo.	70
Figura 63 - Utilizador executando a tarefa de abrir a porta na feira da Futurália	72
Figura 64 - Desempenho médio em tempo de tarefa dos participantes para cada subtarefa da tarefa global de abertura da porta virtual (controlador HTC vive vs Cyber-luva).	73
Figura 65 - Comprimento médio do caminho descrito pela mão dos participantes, para cada subtarefa da tarefa global de abertura de porta virtual (controlador HTC Vive vs CyberGlove - HT).....	73
Figura 66 - a) Tempo médio total da tarefa e b) comprimento médio total do caminho descrito pela mão dos participantes durante a execução da tarefa global de abertura de porta virtual, Controlador HTC Vive vs CyberGlove - HT.	74
Figura 67 - Resultados de questionários subjetivos aos participantes para avaliar a tarefa de abertura de porta virtual.	74
Figura 68 - Board da PCB do Pulso.....	83
Figura 69 - Board da PCB do Pulso.....	83
Figura 70 - Modelação 3D da CyberGlove - HT.....	84
Figura 71 - Sistema de rastreamento da HTC VIVE	85
Figura 72 - Lighthouse	86
Figura 73 – Controlador da HTC Vive	87
Figura 74 - Princípio de funcionamento do HTC Vive, com α sendo o ângulo entre um plano de varredura e o vetor normal da lighthouse (retirado de [37]).....	88
Figura 75 - Sequências de sinal luminoso (4 são mostradas): pulsos amplos são flashes da estação base e pulsos curtos são varreduras de plano a laser.	88
Figura 76 - Exemplos de fases e tipos de pulso.....	89
Figura 77 - Exemplo de trem de pulso recebido por um fotodiodo num objeto rastreado. .	90

Figura 78 - Constelação de sensores ABC em coordenadas cartesianas	91
Figura 79 - Esquemático do circuito desenvolvido	92
Figura 80 -Board do Tracker desenvolvido.....	93
Figura 81 - a) Desenho do tracker no Solidworks; b) Tracker desenvolvido	93
Figura 82 - Sinal da lighthouse visualizado no osciloscópio	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características de luvas para realidade virtual.....	15
Tabela 2 - Comparação de várias plataformas IMU	18
Tabela 3 - Frequência cardíaca normal para homens.....	24
Tabela 4 - Frequência cardíaca normal para mulheres.	25
Tabela 5 - Módulos de processamento.....	27
Tabela 6 - Lista de pinos da ESP8266-07	37
Tabela 7 - Modos de operação.....	41
Tabela 8 - AXIS_MAP_CONFIG	42
Tabela 9 - AXIS_REMAP_SIGN.....	42
Tabela 10 - Seleção de modos de energia	43
Tabela 11 - AC_NM_SET.....	43
Tabela 12 - Períodos de tempo limite sem movimento.....	44
Tabela 13 - Características do vibro-motor.....	48
Tabela 14 - Zonas de alcance do VL53L0X.....	49
Tabela 15 - Ordem dos dados do pacote	54
Tabela 16 - Tempos de Ativação	87
Tabela 17 - Codificação do pulso de sincronização do lighthouse.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

I²C - Inter-Integrated Circuit
2D - Duas Dimensões
3D - Três Dimensões
GDL - Graus De Liberdade
5DT - 5th Dimentisons Technologies
ADC - Analog-Digital Converter
BPM - Batimentos Por Minuto
CAD - Computer-Aided Design
FEDER - Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional
GND - Ground
HMD - Head Mounted Display
HTPDIR - Human Tracking and Perception in Dynamic Immersive Rooms
I&DT - Investigação e Desenvolvimento Tecnológico
IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers
IMU - Inertial Measurement Unit
IP - Internet Protocol
LED - Light Emitting Diode
LiPo - Lithium Polymer
MCP - Metacarpophalangeal
MEMS - Microelectromechanical Systems
PC - Personal Computer
PCB - Placa de Circuito Impresso
PD - Photo Diode
PIP - Proximal Interphalangeal
POCI - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização
PPG - Photoplethysmogram
PWM - Pulse Width Modulation
RI - Realidade Imersiva
RV - Realidade Virtual

SDK - Software Development Kit

SMD - Surface-Mounted Device

ToF - Time of Flight

UART - Universal Asynchronous Receiver Transmitter

UDP - User Datagram Protocol

USB - Universal Serial Bus

VCSEL - Vertical Cavity Surface-Emitting Laser

VITA - Vida Assistida por Ambientes Inteligentes

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Percentagem

€ - Euro

° - Grau

μ - Média

μm - Micrómetro

Ah - Ampere-hora

cm - centímetro

dps - degree per second

Hb - hemoglobina

HbO₂ - oxiemoglobina

Hz - hertz

KB - Kilobyte

KHz - Kilohertz

kΩ - Kiloohm

m - metro

mA - miliampere

mAh - miliampere-hora

MB - Megabyte

mm - milímetro

ms - milissegundos

nm - nanómetro

V - Volt

β - Beta

θ - Theta

σ - Sigma

1 Introdução

1.1 Contexto e motivação

Realidade virtual (RV) e realidade imersiva (RI) são tecnologias cujas aplicações vão muito para além dos jogos, nomeadamente em áreas como reabilitação, promoção imobiliária, educação e formação médica, exposições de museus, *showrooms*, simulação de cenários de acidentes e treino policial [1]. O potencial de adaptar qualquer espaço para um novo mundo virtual dinâmico em que o utilizador se pode mover, abre um conjunto de novos desafios relacionados à imersão. A eficácia dos ambientes de RV depende fortemente de fornecer os mesmos estímulos que os experimentados no mundo real. Existem já vários sistemas RV comerciais de baixo custo disponíveis que proporcionam uma experiência eficaz ao utilizador em grandes espaços (e.g., HTC Vive, Oculus Rift S), com um rastreamento corporal muito confiável.

Para interação do utilizador com RV, a maioria dos sistemas usa controladores manuais com botões de clique e sensores inerciais. No entanto, a interação nem sempre é percebida como natural, porque enquanto os utilizadores seguram esses controladores, não podem agarrar ou tocar objetos reais numa interação de realidade mista, ou comprometem a incorporação na interação de realidade virtual. Abordagens mais recentes baseadas em sistemas de luvas parecem poder ajudar a obter uma interação mais natural do utilizador, libertando as mãos do utilizador, permitindo a deteção de movimentos dos dedos, fornecer *feedback* tátil e reconhecimento de gestos.

As Cybergloves abrem uma nova gama de aplicações em jogos, indústria, treino em cirurgia, reabilitação e educação, graças à sua maior capacidade de manipular objetos. Por exemplo, as luvas com *feedback* háptico têm sido propostas para reabilitação motora dos dedos, mãos ou braços ou para treinar procedimentos cirúrgicos., na medida em que fornecem a perceção de contacto com objetos virtuais. Várias abordagens tecnológicas para esse problema são descritas no Capítulo 2, as quais incluem o uso de sensores de força combinados com atuadores vibro-táteis. O uso de sensores resistivos flexíveis e IMU (*Inertial Measuring Unit*) são normalmente usados para rastrear a posição e orientação das mãos e dos dedos.

Neste projeto de Mestrado, propõe-se uma CyberGlove - HT para melhorar a sensação imersiva e o grau de incorporação em tarefas de interação de realidade virtual e mista (que combina realidade virtual com a real). Em particular, propõe-se um sistema de luvas que pode rastrear os movimentos do pulso, orientação das mãos e movimentos dos dedos. A maioria dos sistemas de RV não fornece uma posição desacoplada do pulso e da mão, embora as tarefas reais de manipulação da mão exijam que esses dois movimentos sejam independentes. Assim, a percepção desses dois graus de liberdade diferentes aumenta significativamente a percepção da incorporação em todos os tipos de tarefas de interação da mão, para as quais a articulação entre a mão e o pulso não é rígida. Além disso, o ângulo de curvatura dos dedos é detetado, fornecendo uma percepção dos movimentos dos dedos. A CyberGlove - HT também possui um sensor de batimento cardíaco e um sensor de distância na parte de trás da mão que deteta obstáculos próximos, alertando o utilizador ativando uma estimulação vibro-tátil.

O sistema foi testado num ambiente virtual no qual os utilizadores executam tarefas de interação, tais como agarrar e girar maçanetas, empurrar ou puxar gavetas. Comparou-se a naturalidade, a usabilidade, a imersão e a percepção da incorporação usando a CyberGlove - HT desenvolvida e os controladores manuais da HTC Vive.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de IC&DT HTPDIR (Human Tracking and Perception in Dynamic Immersive Rooms), que resulta da parceria entre o Instituto Politécnico de Tomar, a Universidade de Coimbra e a empresa SketchPixel (promotora do projeto), tendo como potencial aplicação a promoção do setor imobiliário através de visitas virtuais. O desenvolvimento da CyberGlove - HT visa entender em que medida esta pode melhorar a interação do utilizador em cenários imersivos.

A Figura 1 apresenta um setup típico de sistemas de realidade imersiva, ilustrando todos os seus elementos mais representativos, nomeadamente:

- Headset de realidade imersiva - Óculos que proporcionam ao utilizador uma visão 360° do cenário virtual imersivo (ou combinado “mixed reality”) consistente com os movimentos do utilizador;
- Controladores para as mãos: dispositivos que possibilitam ao utilizador interagir com o ambiente virtual (manusear objetos, tomar opções, etc);
- Sistemas de rastreamento (*tracking*) para fazer o rastreio da posição e orientação dos controladores (mãos) e do Headset (cabeça);

- Computador de elevada capacidade de processamento e desempenho gráfico capaz mapear o ambiente 3D, os objetos e as interações, e sintetizar as imagens a apresentar no visor dos óculos de realidade virtual.
- Sistema de comunicação de dados que pode ser por cabo ou *Wireless* que permite a comunicação entre os vários dispositivos do sistema.

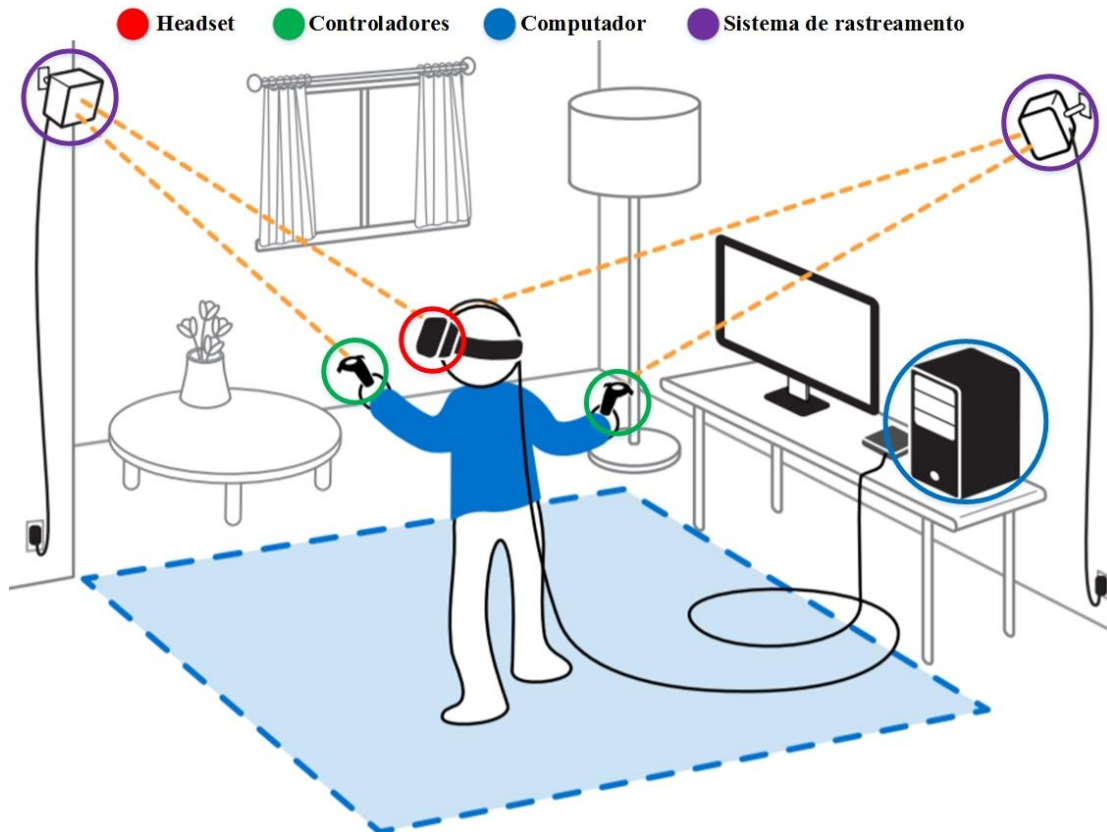


Figura 1 - Cenário da sala de realidade imersiva (Adaptado de [2])

1.2 Objetivos

O trabalho de Mestrado descrito neste documento teve por base os desenvolvimentos realizados no âmbito do projeto de I&DT HTPDIR. O principal objetivo consistiu no desenvolvimento de uma luva de interação/manipulação (CyberGlove - HT) que complementasse os setups típicos de realidade virtual/imersiva. Em particular, pretendeu-se desenvolver uma luva que melhorasse a percepção de incorporação e a naturalidade na

interação. Nesse sentido foram definidas as seguintes especificações para o protótipo da CyberGlove - HT:

- Rastreamento dos movimentos do pulso, da mão e dos dedos
- Detecção da força exercida na extremidade de cada dedo;
- Detecção de possíveis obstáculos na proximidade da mão;
- Feedback háptico;
- Medição do batimento cardíaco;
- Elevado nível de autonomia (≥ 9 horas de duração da bateria);
- Luva vestível com elevado nível de ergonomia e garantindo a palma da mão livre;
- Miniaturização em PCB com componentes SMD para tornar a luva leve e com elevado nível de usabilidade;

Para além destas especificações, pretendia-se que a que a luva tivesse custo reduzido, no que diz respeito aos materiais/componentes usados para a sua conceção.

1.3 Implementações e contribuições chave

Foram desenvolvidos/realizadas os(as) seguintes módulos/tarefas:

- Modelação 3D da CyberGlove - HT e impressão em material flexível;
- Programação de microcontrolador Cadence Tensilica L106 (integrado no módulo ESP8266) para leitura de sensores, processamento e comunicação de dados;
- Configuração e calibração do módulo inercial BNO055;
- Interface com sensores VL530LX, BNO055, MAX30105, Spectra Symbol 2.2 e FSR 402, assente em comunicação I²C, entradas analógicas e digitais, e atuação do vibromotor;
- Transmissão em tempo real (comunicação assente em UDP/IP usando o módulo ESP8266) dos dados sensoriais para o PC responsável pela modelação 3D imersiva (aplicação Unity);
- Módulo de carregamento e configurações de gestão de energia;
- Integração de todos os módulos no protótipo final;
- Testes experimentais de validação em contexto real (tarefas de realidade imersiva).

A Figura 2 apresenta o diagrama de blocos da arquitetura de *hardware* da CyberGlove - HT, ilustrando alguns dos módulos referidos atrás.

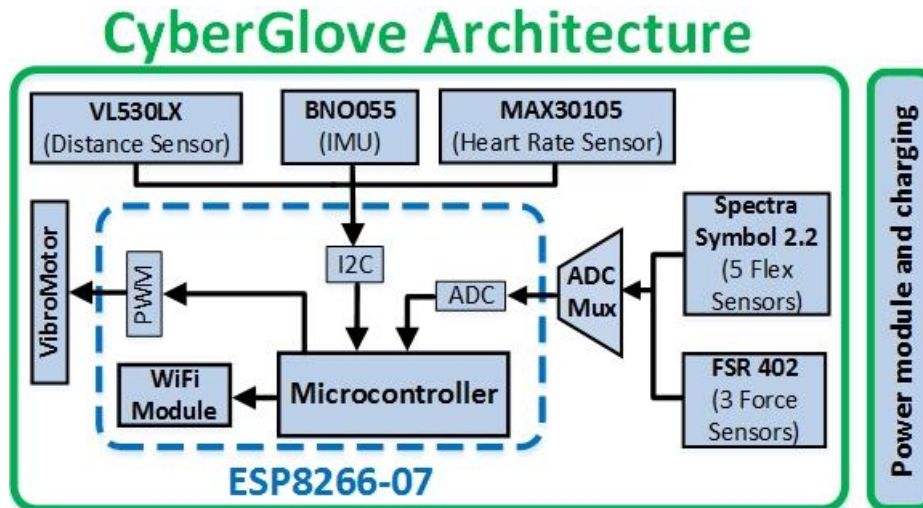


Figura 2 - Arquitetura global do protótipo da CyberGlove - HT.

1.4 Estrutura do Relatório

O presente documento está organizado em 6 capítulos, sendo as temáticas abordadas em cada um enumeradas de seguida.

O capítulo seguinte (capítulo 2) é denominado de “Estado da Arte” e apresenta uma contextualização e enquadramento do trabalho realizado, fazendo um levantamento dos dispositivos de interação existentes no mercado e estudos de trabalhos de investigação referentes ao desenvolvimento de luvas RV, apresentando as suas características principais.

O capítulo 3, denominado “Tecnologias e Ambientes de Desenvolvimento”, apresenta as tecnologias e os ambientes de desenvolvimento utilizados.

O capítulo 4, denominado “CyberGlove - HT”, descreve o desenvolvimento do *hardware* e *software* do protótipo da CyberGlove - HT.

O capítulo 5, denominado de “Resultados” apresenta os resultados alcançados com destaque para os protótipos finais e para os resultados experimentais de validação do protótipo.

Por último, no capítulo 6, “Conclusão” são apresentadas as conclusões gerais do trabalho realizado.

2 Estado da Arte

2.1 Introdução

A realidade virtual é uma tecnologia que tem vindo a ser desenvolvida gradualmente desde o início do século passado, onde se pode interagir, numa experiência multissensorial e imersiva, com um ambiente virtual tridimensional sintetizado. Apesar das primeiras aplicações serem simples ou pouco funcionais devido a grandes limitações a nível do *hardware*, novas tecnologias e técnicas foram investigadas e desenvolvidas desde então. Na última década, devido a uma grande evolução a nível de *hardware* e *software*, houve um crescimento do interesse na realidade virtual [3]

Hoje em dia, existem várias empresas a investigar e desenvolver dispositivos dedicados a experiências de realidade virtual. Enquanto dispositivos que suportam os sentidos visual e auditivo estão relativamente bem desenvolvidos, *hardware* que suporte os restantes três sentidos (tato, olfato e paladar) estão ainda na sua infância. Apenas recentemente, houve um crescimento do interesse na investigação de tecnologias que possam providenciar esses sentidos.

O fornecimento do *feedback* háptico na interação com objetos virtuais é uma questão que maioria dos investigadores tem vindo a tentar resolver utilizando os dispositivos como luvas de realidade virtual, ou superfícies que apresentam diferentes técnicas de estimulação de forma a facultar ao utilizador a sensação de toque ou reproduzir o movimento das suas mãos ou dedos. No entanto estes dispositivos evidenciam limitações significativas, devido ao tipo de sensores usados e falta de usabilidade dos sistemas. Surge assim uma necessidade de encontrar soluções mais naturais para obter uma interação com *feedback*. A utilização de objetos reais em ambientes virtuais pode ajudar nas experiências de realidade virtual.

As secções seguintes introduzem conceitos que ajudam ao entendimento das restantes partes do relatório, e apresentam o estado da arte em Cybergloves permitindo enquadrar o trabalho realizado.

2.2 Biomecânica da Mão

A mão é a parte relativa à extremidade do membro superior do corpo humano que coordena vários movimentos em simultâneo, com precisão e delicadeza ou força, dependendo da situação ou objetivo pretendido. A mão é constituída pela falange (14 ossos), carpo (8 ossos), metacarpo (5 ossos) completando um total de 27 ossos representados na Figura 3 [4].

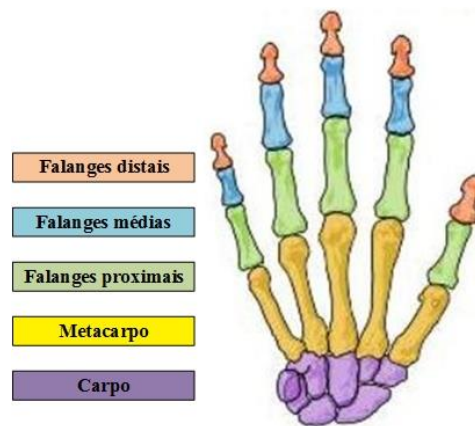


Figura 3 - Representação óssea da mão esquerda humana (retirado de [5])

O movimento de abertura e fecho da mão é fundamental para interação com o meio e manipulação de objetos, esses movimentos de agarrar e manipular objetos são exequíveis graças à posição do polegar em relação aos restantes dedos da mão. O polegar realiza diferentes rotações e ocupa uma posição perpendicular à palma da mão, os outros dedos realizam movimentos de extensão/flexão e adução/abdução representados na Figura 4. Nesse sentido, a modelação e percepção destes movimentos no ambiente imersivo são de extrema importância.

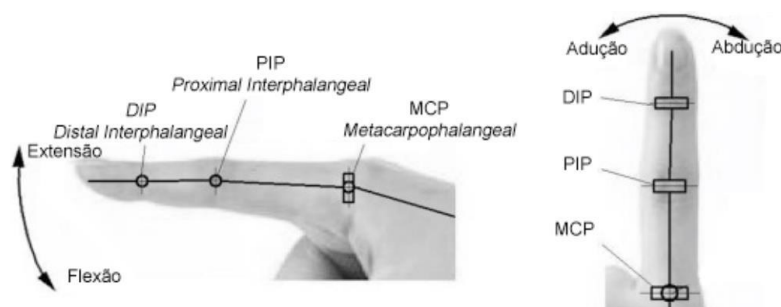


Figura 4 - Articulações e graus de movimento do dedo indicador (retirado de [6])

2.3 Realidade virtual

Realidade Virtual/Imersiva (RV/RI) é uma representação gráfica do espaço cibernético (espaço não físico ou territorial,) [7]. Além de ser possível que as pessoas se movimentem neste espaço, os sistemas mais sofisticados possibilitam que as pessoas manipulem informações ou objetos [7]. Isto inclui não só o uso de visão, mas também da audição, do tato, do toque, associados a todas as sensações associadas à resistência, à força, movimento, temperatura e peso. Os dispositivos de RV operam em diferentes níveis de interação, tais como [7]:

- **RV para passear** - liberdade para movimentar, virar e olhar em qualquer direção no espaço virtual (seis graus de liberdade - 6GDL).
- **RV reativa** - liberdade da RV para passear, e também de, quando o utilizador interage com os objetos, de estes responderem com um comportamento predefinido, ou eventualmente permitir que os altere.

Em relação aos tipos de imersão, existem desde o mais simples que exige apenas um computador e o programa, até o mais avançado que necessita de um programa RV mais complexo e envolve maior aparato em termos de equipamento.

- **Realidade Virtual de Simulação** - consiste num monitor do computador ou um projetor de dados que oferecem uma “janela” para dentro de um mundo virtual, o utilizador tem a sensação de estar do outro lado do ecrã como nos jogos de simulação de voo.
- **Realidade Virtual Projetada** - o monitor ou projetor estéreo apresentam uma imagem estereoscópica sendo necessário colocar os óculos polarizados. Com óculos, o mundo virtual parece ser dimensional, o utilizador tem a sensação de aprofundar dentro do monitor e que as imagens avançam em sua direção. Um exemplo desta sensação são os filmes em 3D que precisam do uso de óculos especiais para serem vistos.
- **Imersiva** - Com um ecrã preso à cabeça (HMD - *Head Mounted Display*) o utilizador é transportado para dentro do mundo virtual. Através do rastreamento da cabeça, o

computador conhece e ajusta o seu ponto focal, quando se olha para cima, vê-se o céu virtual, quando se olha para baixo, vê-se o chão virtual.

- **Telepresença** - é o termo que designa a presença humana no ambiente virtual e pode ser obtida pelo uso do monitor do computador ou das interfaces mais sofisticadas como a HMD.

2.4 Luvas para realidade virtual

O interesse em desenvolver dispositivos hápticos direcionados para realidade virtual tem crescido nas duas últimas décadas. O “háptico” em RV/RI é amplamente definido como recriar o sentido do tato por meio de forças, vibrações e movimentos.

A primeira luva virtual foi desenvolvida na Universidade de Illinois em 1977, para um projeto denominado “*Sayre Glove*” [8].



Figura 5 - Sayre Glove (retirado de [9])

Uma das primeiras aplicações em âmbito mundial e que tornou famoso este dispositivo foi o filme *Star Wars* (1977). Mais tarde, vários filmes da *Walt Disney* passaram a usar esta tecnologia, e atualmente cerca de 98% dos filmes de animação, tais como *Shrek*, usam luvas e fatos virtuais. Mais recentemente, no âmbito da medicina, está a ser testado a utilização de luvas virtuais em operações delicadas, principalmente nos casos em que não pode haver contacto entre o médico e o paciente pelo risco de morte [8].

No âmbito desta dissertação serão abordadas com maior detalhe as diferentes alternativas existentes para monitorização do movimento da mão/ dedos e força de cada dedo.

2.4.1 CyberGlove III

A CyberGlove III [10] (Figura 6) é uma luva produzida pela *Cyber Glove Systems*, e utiliza 18 ou 22 sensores piezoresistivos para medir os deslocamentos angulares das articulações. Na luva com 18 sensores existem dois sensores em cada dedo para medir os seus movimentos de flexão/extensão, dos restantes oito sensores quatro são para medir o movimento de adução/abdução, dois para medir a curvatura da palma da mão e mais dois para medir o movimento de flexão e abdução do polegar. Já na versão com 22 sensores os quatro sensores a mais que na versão de 18 sensores são utilizados para medir o movimento de flexão/extensão das articulações DIP (Figura 4).



Figura 6 - CyberGlove III (retirado de [10])

2.4.2 5DT Data Glove

A Data Glove 5 Ultra e Data Glove 14 Ultra foram desenvolvidas pela 5th *Dimentions Technologies* (5DT). Essas luvas usam sensores baseados em fibra ótica para determinação da posição relativa e individual de cada dedo. A Data Glove 5 tem cinco sensores de fibra ótica, um para cada dedo, ver a vermelho na Figura 7 a), que medem a flexão das articulações MCP e PIP (Figura 4). A Data Glove 14 tem um total de catorze sensores sendo 3 por cada dedo, um mede o deslocamento angular da articulação MCP, outro mede o deslocamento angular da articulação PIP e o último mede o deslocamento angular associado aos movimentos de adução e abdução entre dois dedos, representados, respetivamente, a vermelho, verde e amarelo na Figura 7 b).



Figura 7 - a) Data Glove 5 Ultra; b) Data Glove 14 Ultra (adaptado de [11])

2.4.3 MoCap Pro Glove

A luva MoCap Pro Glove [12] contém cinco sensores splay altamente precisos que fornecem dados de movimento confiáveis. Cada dedo contém um sensor splay que tem três zonas de detecção para capturar a flexão de cada junta, bem como a extensão lateral.



Figura 8 - MoCap Pro Glove (Retirado de [12])

2.4.4 IGS Glove

A IGS Glove [13] incorpora sensores inerciais que fazem a aquisição dos movimentos da mão e dedos. Existem três modelos da luva, com sete, doze e quinze sensores (Ver Figura 9).

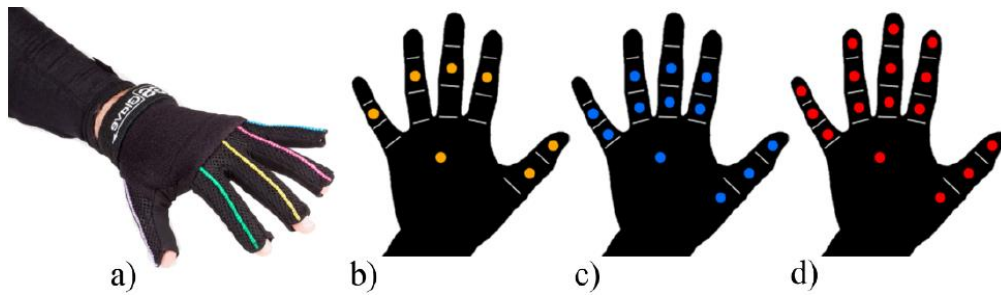


Figura 9 - a) IGS Glove; Disposição dos sensores: b) sete sensores, c) doze sensores e d) quinze sensores (retirado de [11])

2.4.5 Manus VR (Prime One)

A Manus VR (Prime One) [14] é composta por dez sensores resistivos flexíveis (2 para cada dedo) e dois IMU (um para o mão e um para o polegar).



Figura 10 - Manus VR (Prime One retirado de [14])

2.4.6 Avatar VR



A Avatar VR (Figura 11) utiliza tecnologia de rastreamento da parte superior do corpo, baseada em sensores IMU que rastreiam os movimentos dos braços e mãos com grande precisão. Para rastrear o movimento dos dedos é utilizado 7 sensores, o polegar tem dois IMU e um sensor flexível e os restantes dedos tem um IMU cada. A luva fornece um *feedback* tátil através de uma série de 10 atuadores vibro-táteis que vibram em frequências às quais os seres humanos são naturalmente recetivos, de modo que o cérebro o interpreta como entrada "*Real Touch*" [15].



Figura 11 - Avatar VR (retirado de [16])

A Tabela 1 resume e compara as diferentes características/tecnologias utilizadas nas luvas de realidade virtual.

Tabela 1 - Características de luvas para realidade virtual

Nome do Dispositivo	Movimento dos dedos	Movimento do pulso	Feedback tátil	Sem fio	Palma da mão livre	Duração da bateria (horas)	Preço (€)	Alcance (metros)	Material
CyberGlove - HT (o nosso protótipo)						9	160	>90	Filaflex
Glove ISR [17], 2017						---	---	---	---
CyberGlove III [10], 2017						2	15000	>30	---
5DT Data Glove [18]						8	1225 a 6763	20	Lycra elástica
Manus VR (Prime One) [14]						---	2990	---	Tecidos elásticos
Plexus VR Glove [19]						2 a 3	249	20	---
Avatar VR [15]						5 a 8	1499	20	Lycra elástica
Haptx Glove [20]						---	---	---	---
CyberTouch [21], 2017						---	---	---	---
MoCap Pro Glove [12]						8	4555	20	---
IGS Glove [13]						4	---	---	---

--- Não refere/Não aplicável

2.5 Conclusão

Neste capítulo foram referidos diferentes tipos de luvas para realidade virtual que integram algumas tipologias de sensores diferentes. Algumas dessas luvas monitorizam mais detalhadamente a posição de cada articulação, como são os casos da Avatar VR, Manus VR (Prime One), Cyber Glove III e IGS Glove. A maioria das luvas apresentadas são feitas de tecido o que não permite fazer uma limpeza da luva, pois a CyberGlove - HT por ser impressa utilizando o material Filaflex ela pode ser limpa. A nossa luva e a Plexus VR Glove são as únicas que tem a palma da mão livre.

Em relação aos preços, as luvas disponíveis no mercado são proporcionais às capacidades e funções do equipamento, sendo que aumenta consoante o número de medição dos graus de movimento da mão. A CyberGlove - HT tem características comparáveis a outros produtos comerciais como IGS, Manus VR e Avatar VR. No entanto, o custo do protótipo de CyberGlove - HT é significativamente menor (160€) comparando com a Manus VR (2990€) e Avatar VR (1499€). Além disso, CyberGlove - HT possui maior autonomia e permite um contato direto da palma da mão com objetos.

3 Tecnologias e Ambientes de Desenvolvimento

Este capítulo descreve as características e funcionalidades dos sensores, módulos de processamento, comunicação, e os ambientes de desenvolvimento utilizados para a construção do protótipo da Cyberglove - HT.

3.1 Sensores Inerciais

Os giroscópios e acelerômetros são denominados de sensores inerciais pois estes exploram propriedades da inércia para medir respectivamente variações angulares e acelerações lineares. Os sistemas Inerciais são baseados em micro-sensores inerciais, em modelos biomecânicos e em algoritmos de combinação sensorial. A utilização de sensores inerciais foi potenciada pelo desenvolvimento da tecnologia MEMS (*Microelectromechanical Systems* - sistemas microelectromecânicos), que é a tecnologia de dispositivos microscópicos, utilizam um conjunto de técnicas de micro fabricação para desenhar e construir dispositivos e estruturas mecânicas ou eletromecânicas. Estes dispositivos podem variar desde estruturas relativamente simples até elementos extremamente complexos. As suas dimensões físicas podem, também, variar do micrómetro até vários milímetros [22]. Os dispositivos MEMS mais conhecidos são o acelerómetro, giroscópio, magnetómetro, sensor de pressão, sensor térmico de raios infravermelhos, micromotor e microválvulas.

A Tabela 2 apresenta alguns IMUs (BNO055, Adafruit 9-DOF, MTI-1 IMU e OpenIMU300) estudados para o projeto, com algumas das características apresentadas pelos fabricantes. Apesar dos sensores serem de diferentes fabricantes todos são de 9GDL e constituídos por um giroscópio, um acelerómetro e um magnetómetro, todos com 3GDL. De todas as opções, o OpenIMU300 é o único que não possibilita o modo de comunicação I2C. O IMU escolhido para o protótipo CyberGlove - HT foi o BNO055 porque o IMU Adafruit 9-DOF não faz a fusão dos dados dos sensores e a série Xsens MTi-1 IMU tem um preço muito elevado em comparação com os restantes.

Tabela 2 - Comparação de várias plataformas IMU

	BNO055 (Bosch) [23]	Adafruit 9-DOF IMU [24]	MTi-1 IMU (Xsens) [25]	OpenIMU300 (Aceinna) [26]
Preço	9,05€	17,90€	243,95 €	139,23€
Comunicação	I2C, UART	I2C	I2C, SPI, UART	SPI, UART
Tensão de entrada	2,4V – 3,6V	3,3V - 5V	2,16V - 3,45V	3,3V - 5 V
Varição do acelerômetro	$\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ g	$\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ g	± 16 g	± 8 g
Varição do Giroscópio	± 125 a ± 2000 dps	$\pm 250/\pm 500/\pm 2000$ dps	± 2000 dps	± 400 dps
Frequência de saída dos dados	100 Hz	Até 400 Hz	Até 100 Hz	Até 200 Hz
Fusão do sensor	Sim	Não	Sim	Sim

3.1.1 Sensor BNO055

O BNO055 (Figura 12) incorpora um IMU com 9 GDL e fornece uma variedade de sinais de saída, que podem ser escolhidos selecionando o modo de operação apropriado (Ver Tabela 10). Antes de efetuar a leitura de dados do BNO055 é necessário fazer algumas configurações ao sensor, tais como, definição do modo de operação, modo de energia, modo de fusão e calibração. Os modos de fusão do sensor destinam-se a calcular medidas que descrevem a orientação do dispositivo no espaço. Pode ser distinguido entre orientação não absoluta ou relativa e orientação absoluta. A orientação absoluta significa orientação do sensor em relação à Terra e ao seu campo magnético. Os modos de fusão do sensor de orientação absoluta calculam a direção do pólo norte magnético. Nos modos de orientação não absoluta ou relativa, a orientação do sensor pode variar de acordo com a posição como o sensor é colocado inicialmente. Note-se que o sensor fornece orientação absoluta mas não a posição absoluta, sendo necessário um sistema adicional de tracking para esse efeito. Todos os modos de fusão fornecem a orientação do sensor em quaterniões (w, x, y, z) ou em ângulos de Euler (*Roll, Yaw, Pitch*) [23]. Este sensor é usado no protótipo para deteção de orientação das mãos.

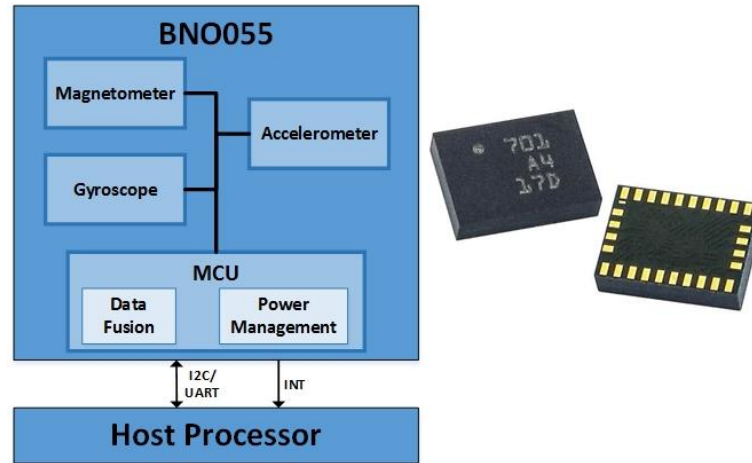


Figura 12 - Arquitetura do BNO055 / IMU-BNO055

3.2 Sensor Piezoresistivo

Os sensores piezoresistivo são baseados no princípio do efeito piezoresistivo que consiste na variação da resistência elétrica de um material semicondutor ou metal quando a uma solicitação mecânica. No contexto de Cybergloves, estes sensores são utilizados tipicamente na monitorização de movimentos de flexão/extensão dos dedos. São constituídos por tintas resistivas (tinta condutora de carbono) apresentando como principal vantagem a sua espessura reduzida e o seu baixo peso. Quando o sensor é fletido, o comprimento da tinta condutora varia e a resistência elétrica do material varia consequentemente devido à alteração da distância entre as partículas de carbono responsáveis pela condução da corrente elétrica [27].

3.2.1 Flex Sensor

Este sensor flexível é uma resistência variável que aumenta à medida que o corpo do sensor se dobra. O sensor flexível está disponíveis em dois tamanhos: um de 5,588 cm (2.2") e outro de 11,43 cm (4.5"). Um lado do sensor é impresso com uma tinta de polímero que contém partículas condutoras, quando o sensor é dobrado as partículas condutoras se afastam, aumentando essa resistência [28].

O sensor quando não está sendo dobrado apresenta uma resistência cerca de $30k\Omega$, à medida que se dobra, a resistência entre os dois terminais aumenta para até $70k\Omega$ a um ângulo de 90° . Colocando uma resistência estática em série com o sensor flexível, tem-se um divisor de tensão, através da dobra do sensor produz-se uma tensão variável que pode ser lida pelo conversor analógico-digital do microcontrolador. Este sensor foi colocado em cima de cada um dos dedos para medir a curvatura dos mesmos. Estes foram os sensores usados no protótipo da CyberGlove - HT para detetar os movimentos dos dedos.



Figura 13 - Flex sensor 2.2 (retirado de [28])

3.3 Sensor Splay

O sensor Splay (Figura 14) é produzido pela empresa neozelandesa Stretch Sense. Este sensor é feito de tiras elásticas de material capacitivo, constituído a partir de uma estrutura polimérica laminar e permitem medir deformações de estruturas flexíveis. Ao ser fletido, a distância entre dois materiais condutores que estão separados por material dielétrico diminui e, a capacidade do material aumenta, dado que é inversamente proporcional à distância entre os dois condutores.



Figura 14 - Sensor Splay (retirado de [29])

3.4 Sensores de força flexíveis

Os sensores de força flexíveis Flexiforce [30] (Figura 15) são sensores de pressão do tipo resistivo constituídos por duas camadas de um substrato de película de poliéster. Em cada uma das camadas é depositado um material condutor, seguida de uma camada de tinta sensível à pressão com a forma correspondente à zona de contacto do sensor. Quando a zona de contacto do sensor é sujeita a uma força há uma variação da resistência elétrica entre as duas camadas do material condutor, caso contrário o sensor apresenta uma elevada resistência elétrica que diminui com o aumento da força exercida no sensor. O sensor mede a presença e magnitude relativa da força física localizada com uma área de deteção redonda de 14,7mm de diâmetro. Estes sensores foram usados no protótipo para detetar se existe força aplicada nesses dedos e fornecer informação para o feedback háptico, nomeadamente no contacto com objetos físicos, ou contacto entre dedos para identificação de ações, para interação com menus, substituindo os botões do controlador, ou para reconhecimento de gestos.

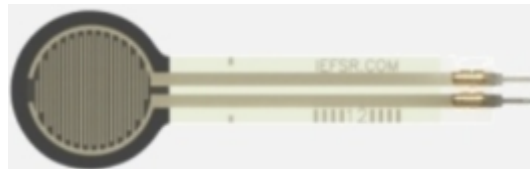


Figura 15 - FSR 402 (retirado de [31])

3.5 Sensores de batimento cardíaco

A deteção automática do batimento cardíaco pode ser obtida a partir de eletrocardiografia ou através de reflectometria ótica. Esta última é a técnica que mais se ajusta a dispositivos *wearable*, sendo por isso a que incorpora tipicamente as braceletes e *smartwatches* disponíveis no mercado, permitindo ler o batimento cardíaco no pulso. Os dedos e o lobo da orelha são os melhores sítios para essa medição, sendo tipicamente usados em ambientes mais controlados como monitorização clínica em hospitais.

O sensor usado no protótipo CyberGlove - HT, é baseado em reflectometria ótica, explicando-se de seguida o seu princípio de funcionamento. O sensor ótico mede a variação

do fluxo sanguíneo, através de um método não invasivo chamado fotopletiografia (a medição ótica de mudanças no volume de sangue nos vasos sanguíneos - em inglês *photoplethysmogram* (PPG)). O método faz uso do facto de que o volume de sangue transportado nas artérias mudar à medida que o coração passa pelo seu ciclo de bombeamento. A luz emitida pelo sensor penetra na pele e é absorvida ou refletida de volta ao detetor (Figura 16).

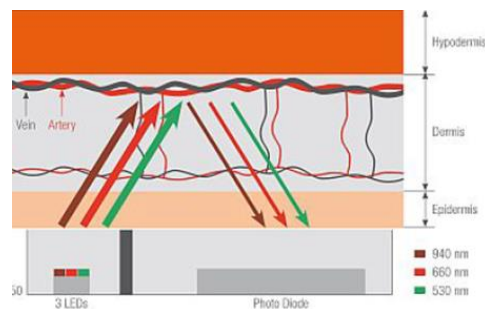


Figura 16 - O princípio das reflexivas óticas do pulso

Essa variação do volume de sangue faz com que haja variações na transmissão e reflexão da pele, e uma vez que a variação no volume de sangue é sincronizada com o batimento cardíaco, esta técnica pode ser usada para calcular o ritmo do batimento cardíaco. O coração expulsa ritmicamente sangue, a contração ventricular é conhecida como sístole e nela ocorre o esvaziamento dos ventrículos, e o relaxamento ventricular é conhecido como diástole e é nessa fase que os ventrículos recebem sangue dos átrios. Isso significa que mais sangue flui através das artérias na fase sistólica, e menos durante a fase diastólica. O intervalo de tempo entre dois picos sistólicos consecutivos é o período do batimento cardíaco (Figura 17).

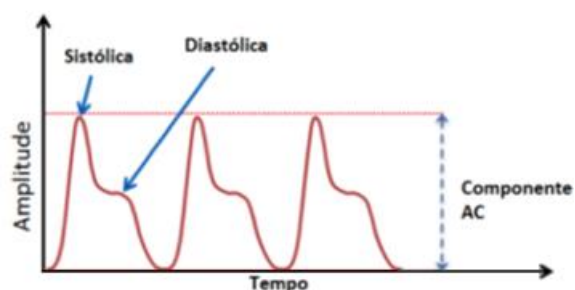


Figura 17 - Gráfico do sinal PPG

A medição do volume de sangue é tipicamente baseada na oximetria, ou seja, na capacidade da hemoglobina no sangue de absorver luz. Um sensor, composto por uma fonte de luz e um detetor dispostos ao lado de um outro, é colocado diretamente sobre a pele. A luz emitida penetra na pele, tecido e sangue vasos e é absorvido, transmitido e refletido. A quantidade de luz refletida registada pelo detetor muda de acordo com a quantidade variável de sangue que flui através das artérias (Figura 16). O comprimento de onda adequado para esta medida depende da parte do corpo onde a medição é tomada. A luz verde fornece os melhores resultados no pulso, enquanto a vermelha e o infravermelho geralmente são usados nos dedos.

3.5.1 Módulo MAX30105

O MAX30105 (Figura 18) foi o sensor usado para a medição de PPG. É um sensor optoelectrónico totalmente integrado, especialmente projetado e otimizado para oximetria de pulso reflexivo. Possui três LEDs, verde (537nm), vermelho (660nm) e Infravermelho (900nm) e por um fotodiodo (photo diode - PD). O LED infravermelho pode ser utilizado como sensor de proximidade para indicar a presença de pele, isso permite iniciar medições quando o sensor está próximo da pele ou para exibir uma mensagem fora de alcance. Para o detetor, os requisitos essenciais incluem alta linearidade, excelente sensibilidade e uma boa relação sinal-ruído. Os fotodiodos oferecem tempos de comutação rápidos permitindo assim detetar pulsos com curto intervalo de tempo entre eles.



Figura 18 - MAX30105

3.5.2 Comprimento de onda da luz

Para oximetria de pulso, são geralmente utilizados comprimentos de onda da luz entre 660nm e 940nm pois eles têm níveis de absorção opostos (Hb - hemoglobina vs. HbO₂ - oxiemoglobina), conforme observado na Figura 19. Para a Monitorização apenas da frequência cardíaca, o comprimento de onda 535nm é uma boa escolha (dependendo da localização do corpo).

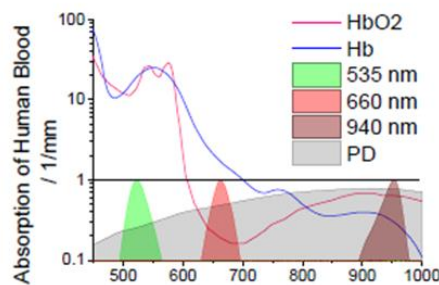


Figura 19 - Absorção de sangue humano (oxiemoglobina, HbO₂ e hemoglobina, Hb) vs. Comprimento de onda da luz. Resposta espectral do foto-díodo (PD) e os espectros de emissão normalizados dos LEDs.

3.5.3 Gama típica de batimentos cardíacos

A frequência cardíaca baixa pode ser considerada aceitável se é um indicador de aptidão cardiovascular e do bom funcionamento do coração. Uma descida abaixo da escala normal pode ser um motivo de preocupação. Os valores típicos estão ilustrados nas Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 - Frequência cardíaca normal para homens.

	entre 18 e 25 anos	entre 26 e 35 anos	entre 36 e 45 anos
Excelente	49 a 55 bpm	49 a 54 bpm	54 a 59 bpm
Boa	57 a 61 bpm	57 a 61 bpm	60 a 62 bpm
Abaixo da média	71 a 73 bpm	72 a 74 bpm	73 a 76 bpm

Tabela 4 - Frequência cardíaca normal para mulheres.

	entre 18 e 25 anos	entre 26 e 35 anos	entre 36 e 45 anos
Excelente	54 a 60 bpm	54 a 59 bpm	54 a 59 bpm
Boa	56 a 61 bpm	60 a 64 bpm	62 a 64 bpm
Abaixo da média	74 a 78 bpm	75 a 76 bpm	74 a 78 bpm

3.6 Sensores de distância

Os sensores de distância têm por objetivo medir a distância entre um ponto de referência e um objeto. Diversas tecnologias podem ser utilizadas para calcular distâncias. Estas são escolhidas de acordo com sua aplicabilidade e precisão desejada [32]. Existem vários tipos de sensores de distância, os quais podem ser agrupados em:

- **Sensores óticos** - são emitidos raios de luz, que ao serem refletidos pelo objeto são detetados por um recetor. Conhecendo a posição do emissor, o recetor identifica a posição do raio refletido e calcula a que distância está o objeto por meio de cálculos geométricos.
- **Sensor de Ultrassom** - é emitido um sinal ultrassônico pelo emissor e este sinal é refletido pelo objeto, como a velocidade do som é conhecida, pode-se, então, calcular a distância do objeto a partir desse intervalo de tempo.
- **Tempo de voo por luz** - consiste na emissão de um pulso de luz que é retornado por um refletor. O tempo que o pulso demora para retornar é proporcional a distância do objeto.
- **Visão estéreo** - é um método passivo de determinação da distância de objetos, pois não emite sinais, apenas recebe informações do meio analisado. Por exemplo, podem ser usadas duas câmaras com posições e parâmetros conhecidos, que captam imagens em perspectivas diferentes. Obtendo as coordenadas (x,y) da posição do ponto desejado nas imagens de ambas as câmaras, pelo cálculo de semelhança de triângulos é possível estimar a distância do objeto.

3.6.1 Módulo VL53L0X

O módulo VL53L0X (Figura 20) incorpora um sensor de distância baseado em tempo de voo de luz, tendo sido a opção usada no protótipo, por ter dimensões reduzidas e alta precisão. É um módulo que funciona na faixa de laser baseado em *Time-of-Flight* (ToF). Fornece medição de distância exata, independentemente da luz ambiente. Pode medir distâncias absolutas até 2 m em ambientes totalmente escuros e até 1.2 m em ambiente com luz. O emissor *VCSEL* (*Vertical Cavity Surface-Emitting Laser*) de 940nm do VL53L0X é totalmente invisível ao olho humano, acoplado a filtros infravermelhos físicos internos, permitindo a medição de distâncias mais longas e maior imunidade à luz ambiente.

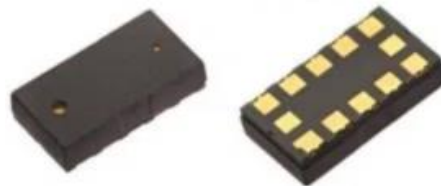


Figura 20 - VL53L0X

3.7 Módulo de processamento e comunicação: ESP8266

Para efetuar a leitura dos sensores, atuação do vibromotor, processamento de dados e transmissão de dados para a aplicação desenvolvida no Unity, foi necessário incorporar um microcontrolador que suportasse comunicação I2C, entradas /saídas digitais, saída PWM e entradas analógicas, e um módulo de comunicação que suportasse *WiFi*. A Tabela 5 apresenta alguns módulos que foram inicialmente considerados para a CyberGlove - HT, nomeadamente o ESP8266, o ESP32 e o Omega2. O Omega2 não tem entrada analógica e saída PWM, tendo por isso sido descartado. A escolha recaiu no ESP8266 em detrimento do ESP32 pelo fato de existirem mais bibliotecas/documentação disponíveis e por, pessoalmente, ter já algum conhecimento/experiência com o ESP8266.

Tabela 5 - Módulos de processamento

Dispositivo	CPU	RAM	Flash	Wifi	ADC	PWM	I2C
ESP8266	80MHz	80k	512KB	sim	Sim	Sim	Sim
ESP32	160MHz	512K	4MB	sim	Sim	Sim	Sim
Omega2	580MHz	64MB	16MB	sim	Não	Não	Sim

O ESP8266, desenvolvido pela Expressif Systems, apresenta uma velocidade de processamento adequada (80 MHz), uma quantidade de memória interna suficiente, diversos protocolos de comunicação (I2C, UART), um número de portas digitais satisfatória e uma porta analógica. Foi escolhido em particular o módulo ESP8266-07, um dos modelos das placas ESP8266, o qual consiste num módulo de WiFi e num microcontrolador Tensilica L106 de 32 bit. O ESP8266-07 possui um *bootloader* série integrado, que permite uma fácil programação e reprogramação, usando um conversor USB-para-Série. Outras características da ESP8266-07 foram importantes para a sua escolha tais como:

- PWM, 2 Timers
- 32 KB de RAM para instruções
- 96 KB de RAM para dados
- 64KBytes de ROM para boot
- IEEE 802.11 b/g/n WI-FI 2.4 GHz, suporte WPA/WPA2
- Consumo de energia em standby 0,9 mA, e em funcionamento normal 50mA.

3.8 SDKs de desenvolvimento de software para ESP8266

Existem várias opções de desenvolvimento de *software* (SDKs) para programar o ESP8266, nomeadamente, FreeRTOS, Arduíno, Python, ESPlorer, etc. Optou-se pelo IDE do Arduíno pela maior facilidade de programação e por este ser open-source, o que permite facilmente adquirir informações úteis bem como aplicá-las, graças à larga comunidade a contribuir com inúmeras livrarias de software. Adicionalmente, o conhecimento prévio de programação na plataforma Arduíno também contribui para a decisão.

Toda a programação da CyberGlove - HT foi desenvolvida com recurso ao IDE Arduíno 1.8.5 desenvolvida sobre uma biblioteca que simplifica a escrita da programação em C/C++, e com acesso às livrarias da ESP8266, WiFiUDP, MAX30105, VL53L0X, BNO0555 e EEPROM.

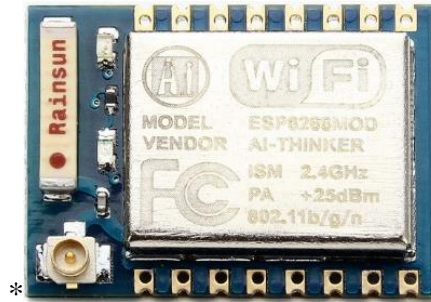


Figura 21 - ESP8266-07

3.9 Ambientes de desenvolvimento gráfico e de renderização

3.9.1 Processing

O Processing foi utilizado na fase inicial do projeto para validação dos dados inerciais devolvidos pelos IMUs associados aos movimentos da mão. O Processing fornece uma linguagem de programação de código aberto e um IDE acessível para as comunidades ligadas às artes, permitindo desenvolvimento gráfico de forma simplificada.

A screenshot of the Processing IDE interface. The window title is 'File Edit Sketch Tools Help'. The code editor shows the following code:

```
import hypermedia.net.*;
import saito.objloader.*;

int PORT_RX=4210; //port
String HOST_IP="192.168.1.122"; // ip do pc
UDP udp;
String receivedFromUDP = "";
float [] q = new float [4];
float [] hq = null;
float [] Euler = new float [3]; // psi, theta, phi

//float [] v = new float [4];

float[] aceleracao=new float [3];
float bpm= 0;
float VBM = 0;
float PM = 0;
```

Figura 22 - Ambiente de programação Processing

3.9.2 Unity

O Unity é uma ferramenta de desenvolvimento de jogos 2D / 3D multiplataforma e experiências interativas, que tem como principais características a facilidade de uso, rápida prototipagem e integração com ferramentas externas como Maya, 3D Studio, Photoshop, Blender, entre outras. O Unity pode ser programado em duas linguagens: C# e Javascript. Apesar de todo funcionamento do Unity ser voltado para o desenvolvimento de jogos, outros tipos de aplicações podem tirar vantagem dos recursos da Unity. De um modo geral, o Unity oferece uma valiosa contribuição no desenvolvimento de aplicações que utilizam recursos como: gráficos 3D, simulações físicas, networking, suporte multimídia e capacidade multiplataforma. Neste projeto, o Unity foi usado para renderização de todos os cenários, reconstrução dos movimentos das mãos e recriação de todos os processos de interação (estes desenvolvimentos foram realizados pela colega do Projeto HTPDIR, Beril Yalçinkaya).

3.10 Software de modelação 3D para impressão 3D

A modelação da luva foi realizada no Solidworks 2018 que é um *software* de CAD 3D (Computer-Aided Design) que dispõe de um amplo leque de funcionalidades para desenhar objetos.

Para impressão 3D foi usada uma impressora 3D Sigma BCN3D [33] existente no laboratório VITA.IPT, a qual consegue imprimir objetos de dimensões 210mm x 297mm x 210mm, com sistema de extrusora dupla independente, que fornece peças de materiais múltiplos de alta resolução de forma simples e eficaz. O diâmetro do bico de impressão é de 0,4mm, mas a versão Sigma tem compatibilidade com os bicos de 0,3/0,4/0,5/0,6/0,8/1mm e a altura da camada é de 0,05 a 0,5 (dependendo do diâmetro do bico). A resolução de posicionamento (X/Y/Z) são respetivamente (12,5µm / 12,5µm / 1µm). Os materiais compatíveis são PLA, ABS, Nylon, PET-G, TPU, PVA, Compósito e outros. O *software* de preparação dos arquivos de impressão é o BCN3D Cura.

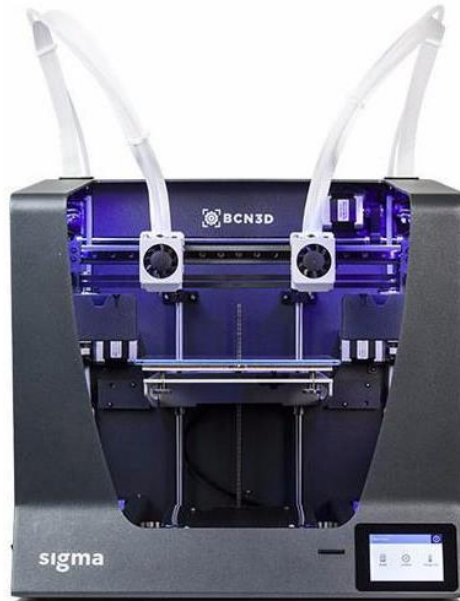


Figura 23 - Impressora Sigma BCN3D

3.11 Modelação de circuito impresso em Eagle 9.5.1

As placas de circuito impresso foram desenhadas no *software* Eagle 9.5.1. Este *software* possui um editor que disponibiliza duas funcionalidades distintas: criação de desenhos dos esquemas de ligação do circuito e criação de desenhos da placas de circuito impresso, estando as duas interfaces de edição interligadas entre si. Desta forma é possível desenhar o esquema do circuito e carregar esse circuito para o *layout* de desenho da placa, onde são dispostos todos os componentes utilizados no esquema e são indicadas as ligações por efetuar através de “airwires”.

3.12 Sistema de localização absoluta 3D do sistema HTC Vive

O sistema de localização/tracking do HTC VIVE é baseado em emissores de infravermelho localizados em dispositivos chamados de Lighthouses e em recetores (fotodiodos) localizados no HMD e nos trackers. Dada a extensão da explicação da tecnologia usada, esta encontra-se descrita no Anexo - secção C.

4 CyberGlove - HT

Este capítulo descreve o desenvolvimento do protótipo CyberGlove - HT, do ponto de vista de *hardware* e *software*.

4.1 Setup da sala de realidade imersiva

A CyberGlove - HT é apenas um dos elementos que compõem o *setup* de realidade imersiva instalado no laboratório do IPT. Existem vários outros elementos, conforme apresentado na Figura 24 e Figura 25.

- Sistema de tracking HTC Lighthouse. Produz um campo de luz de indexação espaço temporal que os sensores no dispositivo rastreado podem medir para determinar a posição e orientação com baixa latência e alta precisão.
- Óculos de realidade virtual HTC Vive (Headset) proporciona ao utilizador uma visão 360° do cenário virtual (ou combinado “mixed reality”) consistente com os movimentos do utilizador. Os movimentos de posição e orientação da cabeça do utilizador rastreados são rastreados pelos sinais da lighthouse.
- Trackers que podem ser colocados em objetos ou em partes do corpo (no nosso caso são usados nos pulsos) para rastrear a sua posição e orientação;
- TPCAST Wireless Adapter: sistema de transmissão wireless de vídeo e posição da do HMD para os óculos HTC Vive, que permite uma maior liberdade de movimentos no espaço considerado, livre de cabos e como tal uma permite uma interação mais natural;
- Computador de elevada capacidade de processamento e desempenho gráfico capaz mapear o ambiente 3D e sintetizar as imagens a apresentar no visor dos óculos de realidade virtual. Ao mesmo tempo terá de comunicar com os dispositivos de interação tais como trackers e CyberGlove - HT;
- 4 Sensores kinect (Kinect v2 for Xbox One) capazes de adquirir informação tridimensional do cenário (cenas estáticas e dinâmicas) para mapeamento e reconstrução de objetos estáticos ou dinâmicos no ambiente imersivo (componente desenvolvida pela equipa de investigação do ISR-UC, parceiro do projeto HTPDIR);

- CyberGlove - HT: luva cuja implementação será descrita neste capítulo.

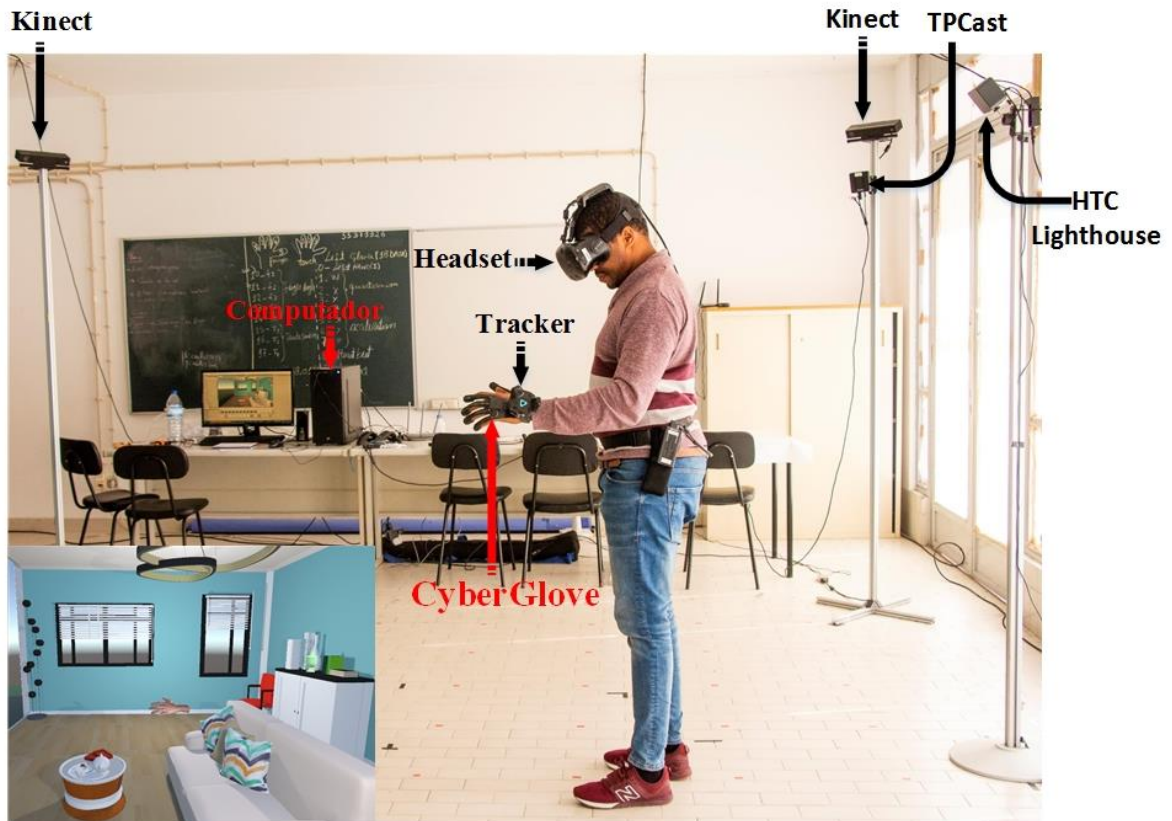


Figura 24 - Cenário da sala de realidade imersiva



Figura 25 - Equipamentos de realidade imersiva, tracking e comunicação utilizados.

4.2 Arquitetura da CyberGlove - HT

A CyberGlove - HT tem por função detetar os movimentos da mão e dos dedos (Figura 26). A posição absoluta do pulso é rastreada com os trackers *HTC Vive* (Figura 26). O protótipo da luva é composto pelos seguintes módulos:

- Um módulo Wi-Fi ESP8266-07 com um microcontrolador Cadence Tensilica L106 incorporado;
- Um sensor IMU (BNO055) com o ARM Cortex M0 incorporado;
- 5 Sensores flexíveis (Spectra Symbol 2.2) que detetam o ângulo de curvatura dos dedos;
- 3 Sensores de força (FSR 400) que fornecem informações de toque em interação de realidade mista;
- Um Analog multiplexer (74HC4051PW) para seleccionar qual dos dados analógicos será lido pelo microcontrolador;
- Um sensor micro-laser de alcance (VL53L0X) responsável por medir a distância a obstáculos físicos;
- Um vibro-motor que é acionado quando a parte de trás da luva está próxima a um obstáculo físico (por razões de segurança), ou em para fornecer feedback em situações de interação com objetos virtuais;
- Um sensor PPG (MAX30105) responsável pela deteção do batimento cardíaco (que pode ser usada para avaliar reações emocionais);
- Uma bateria LiPo (BAT525).

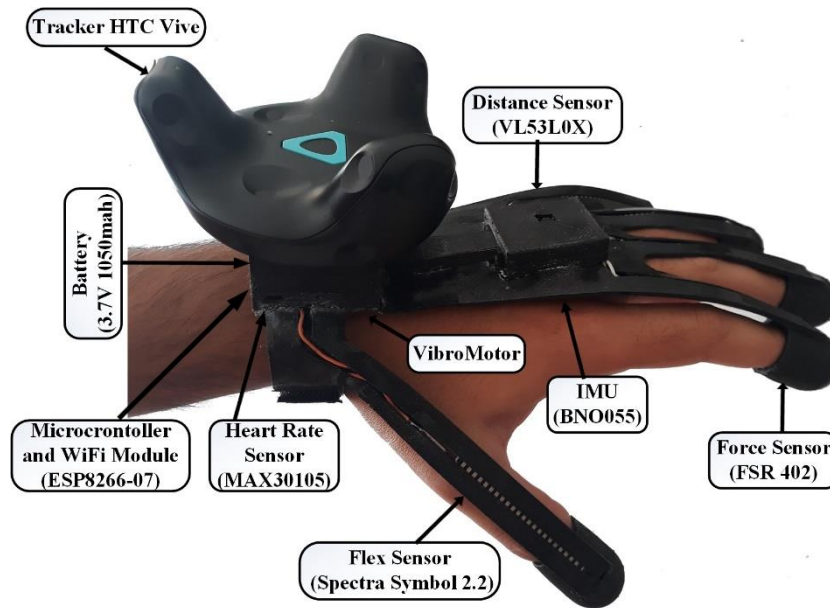


Figura 26 - Protótipo CyberGlove - HT

A arquitetura de *hardware* da CyberGlove - HT está ilustrada na Figura 27. Os dois elementos centrais da CyberGlove - HT são o ESP8266 e o BNO055. O microcontrolador do módulo ESP8266-07 recebe via I2C os dados do BNO055, nomeadamente a rotação em quaterniões e os dados de aceleração nas coordenadas x, y, z. O ESP8266-07 também faz a interface com todos os demais sensores analógicos e I2C, calcula o batimento cardíaco e envia ao BNO055 suas definições de configuração inicial. O módulo WiFi do ESP8266 envia todos os dados da CyberGlove - HT em pacotes UDP/IP para a aplicação Unity em execução no PC host que realiza o processamento e visualização dos dados inerciais. O BNO055 usa três sensores de eixo triplo para medir simultaneamente aceleração tangencial (através de um acelerômetro), aceleração rotacional (através de um giroscópio) e a força do campo magnético local (por meio de um magnetómetro). O BNO055 fornece uma orientação absoluta através da fusão desses três sensores. A configuração e programação destes dois componentes, bem como o interface dos sensores e atuador que compõem o protótipo são explicados nas secções seguintes.

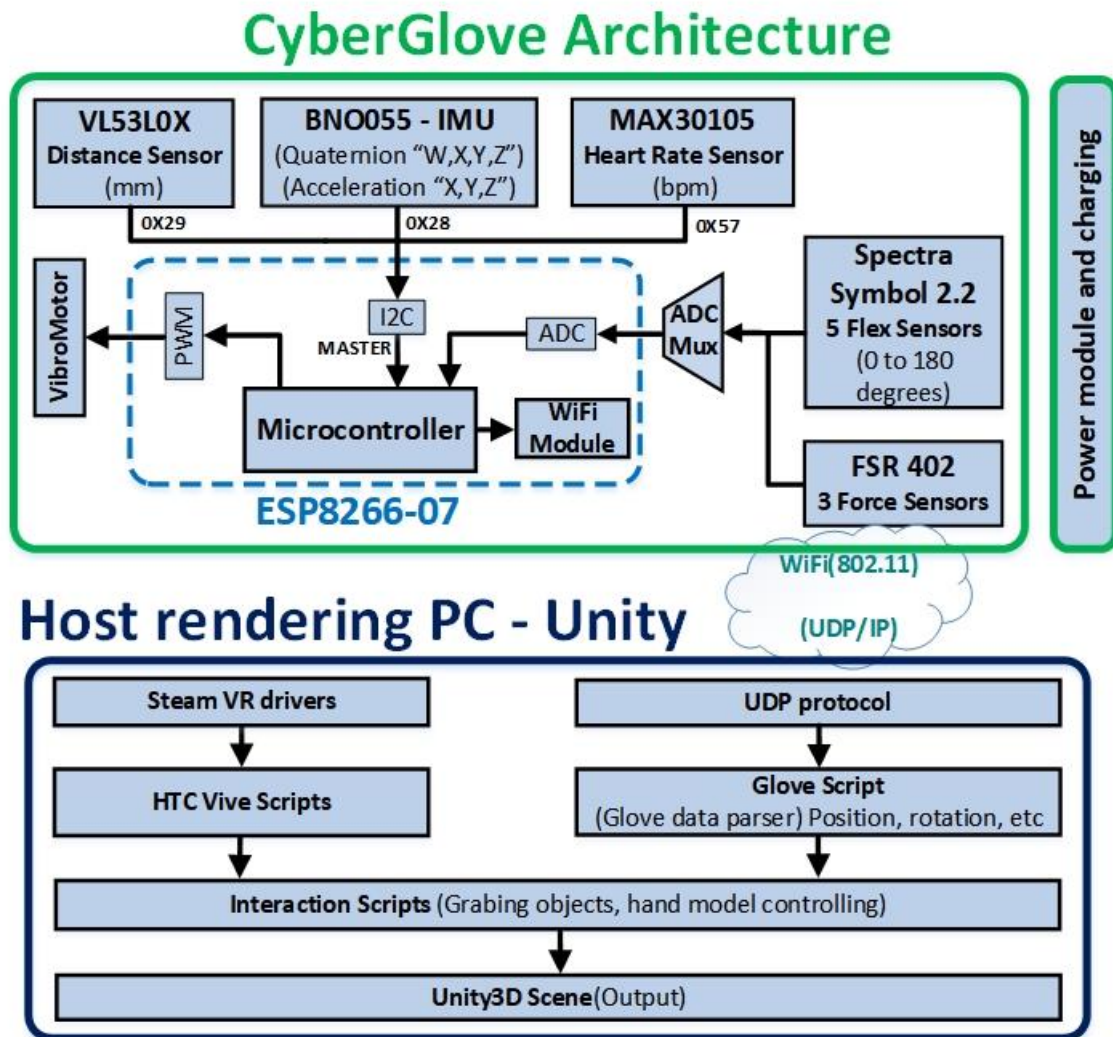


Figura 27 - Arquitetura da CyberGlove - HT e módulos funcionais do Unity.

4.3 Módulo ESP8266-07

O módulo ESP8266-07 pertence à família ESP8266. É um módulo de desenvolvimento com Wireless integrado. É constituído por uma antena Cerâmica IPEX, conector uFL que permite conectar uma antena externa para maior alcance, Serial Flash Memory (25Q80ASSIG) e um microcontrolador Cadence Tensilica L106 (ver esquemático na Figura 28).

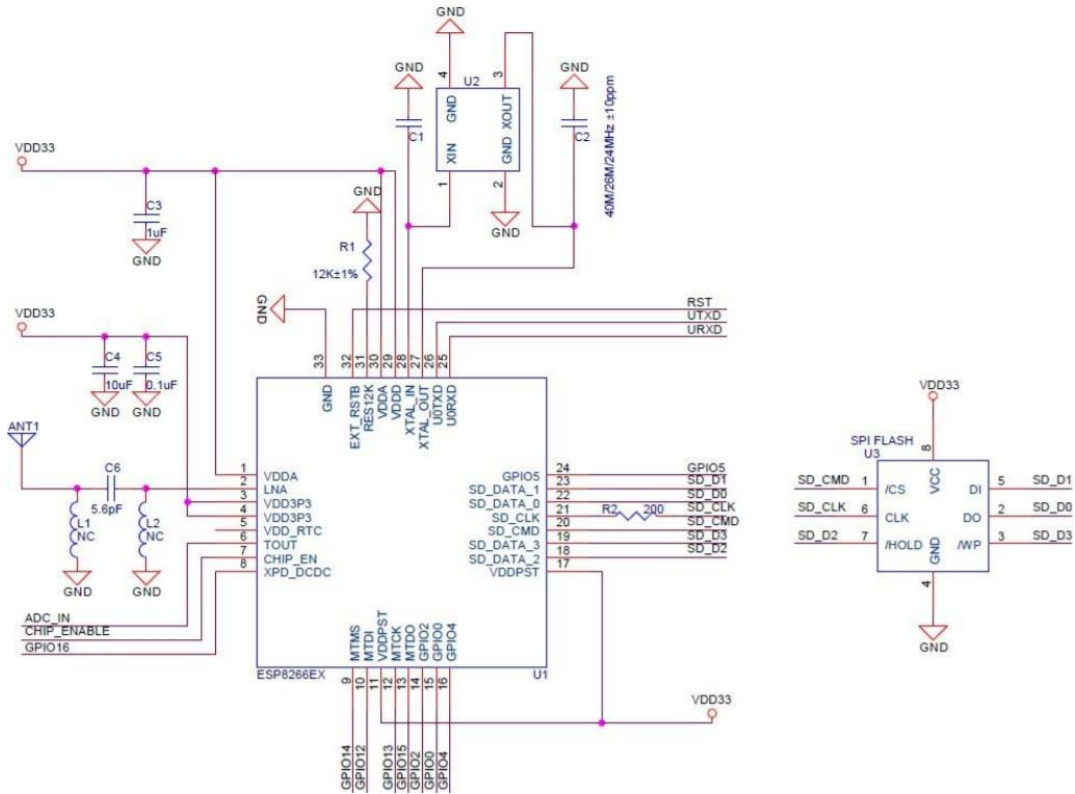


Figura 28 - Esquemático do Módulo WiFi ESP8266-07

A ESP8266-07 tem dois modos de funcionamento, o modo de programação e o modo de funcionamento normal. A transição entre esses dois modos é feita através de *hardware*. Para entrar no modo de funcionamento normal conecta-se o GPIO0 da ESP8266 ao GND e depois pressiona-se no botão do *reset*. A placa FTDI neste modo de funcionamento serve unicamente para realizar *debugging* através da janela de comandos serial (do IDE Arduino).

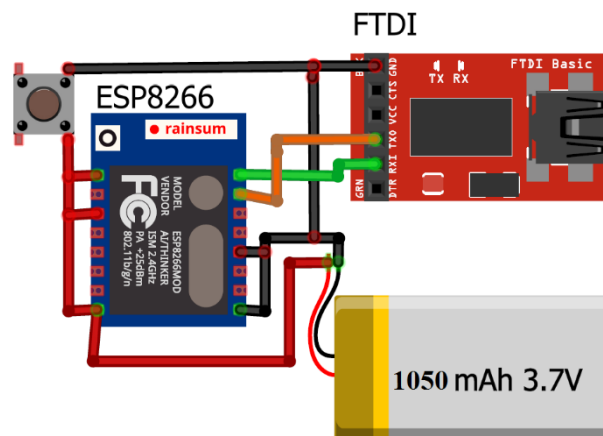


Figura 29 - Modo de funcionamento normal

Notas importantes:

Os conversores TTL para USB têm que, obrigatoriamente, funcionar a 3.3V e não 5V, porque caso essa condição não se verifique corre-se o risco de queimar a ESP8266-07. Tem de se ter em atenção que ao ligar a FTDI ao ESP8266-07, a GND do FTDI está ligado á GND da ESP8266-07. Para a ESP8266-07 ficar em modo de programação tem-se de desconectar o GPIO0 do GND e depois pressionar o botão de reset.

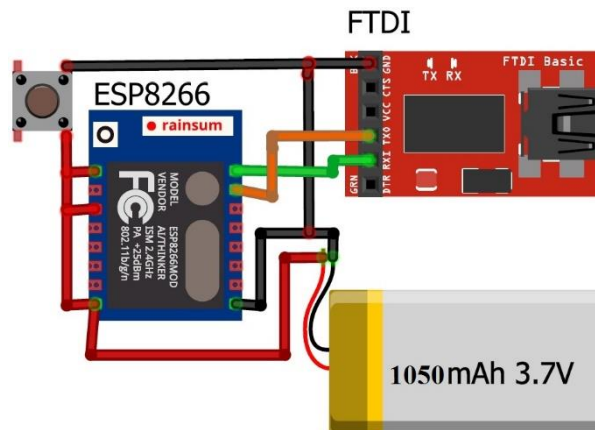


Figura 30 - Modo de programação

Na Tabela 6 é apresentada uma lista da funcionalidade associada a cada um dos pinos do microcontrolador.

Tabela 6 - Lista de pinos da ESP8266-07

Pino	Nome	Descrição	Pino	Nome	Descrição
1	RESET	Reset externo	9	GND	0 V
2	ADC	Entrada analógica	10	GPIO15	Deve estar ligado ao GND
3	CH_PD	Ativação de chip	11	GPIO2	Output/Input
4	GPIO16	Output/Input	12	GPIO0	Deve estar alto na operação normal, baixo para update
5	GPIO14	Output/Input	13	GPIO5	SDA
6	GPIO12	Output/Input	14	GPIO4	SCL
7	GPIO13	Output/Input	15	RX	Recebe dados
8	VCC	3.3V	16	TX	Transmite dados

O ESP8266-07 tem por função fazer leitura dos sensores analógicos e dos sensores ligados por I2C. O ESP8266-07 encontra-se ligado via I2C com BNO055 (0x28), VLX53L0X (0x29) e MAX30105 (0x57) com frequência de relógio de 400KHz. O ESP8266 é o Master no barramento I2C e os sensores são Slaves, todos os dispositivos ligados no barramento podem enviar e receber dados do barramento mas é o Master que inicia a transferência, gera o sinal de relógio e termina a transferência. O esquemático de interligação de todos os dispositivos da CyberGlove - HT encontra-se nas Figura 31 e Figura 32

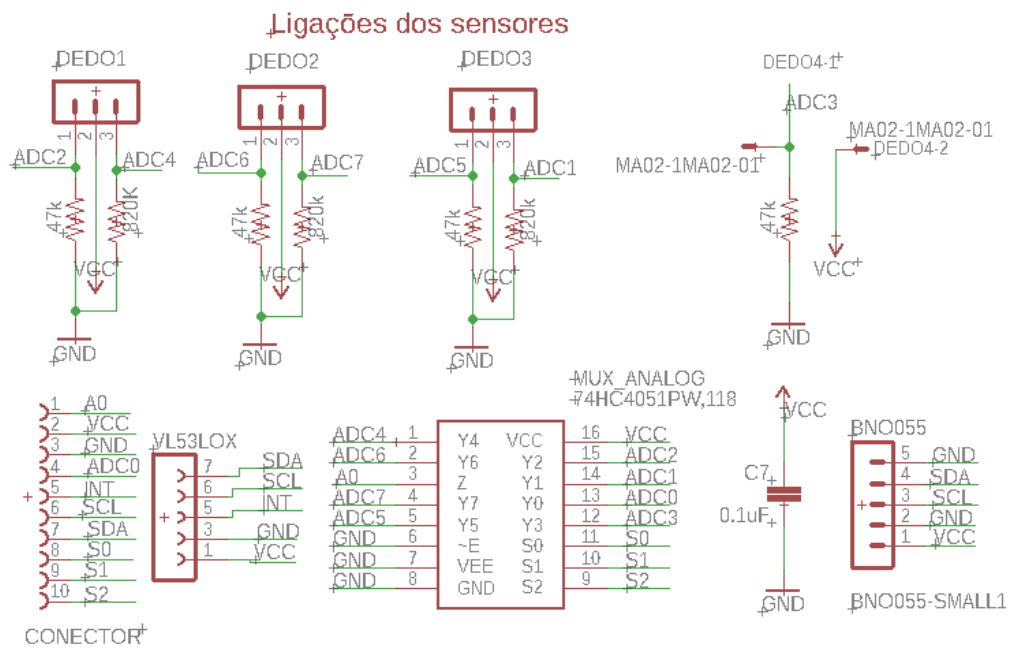


Figura 31 - Esquemático do Circuito da PCB da CyberGlove - HT (parte localizada na mão).

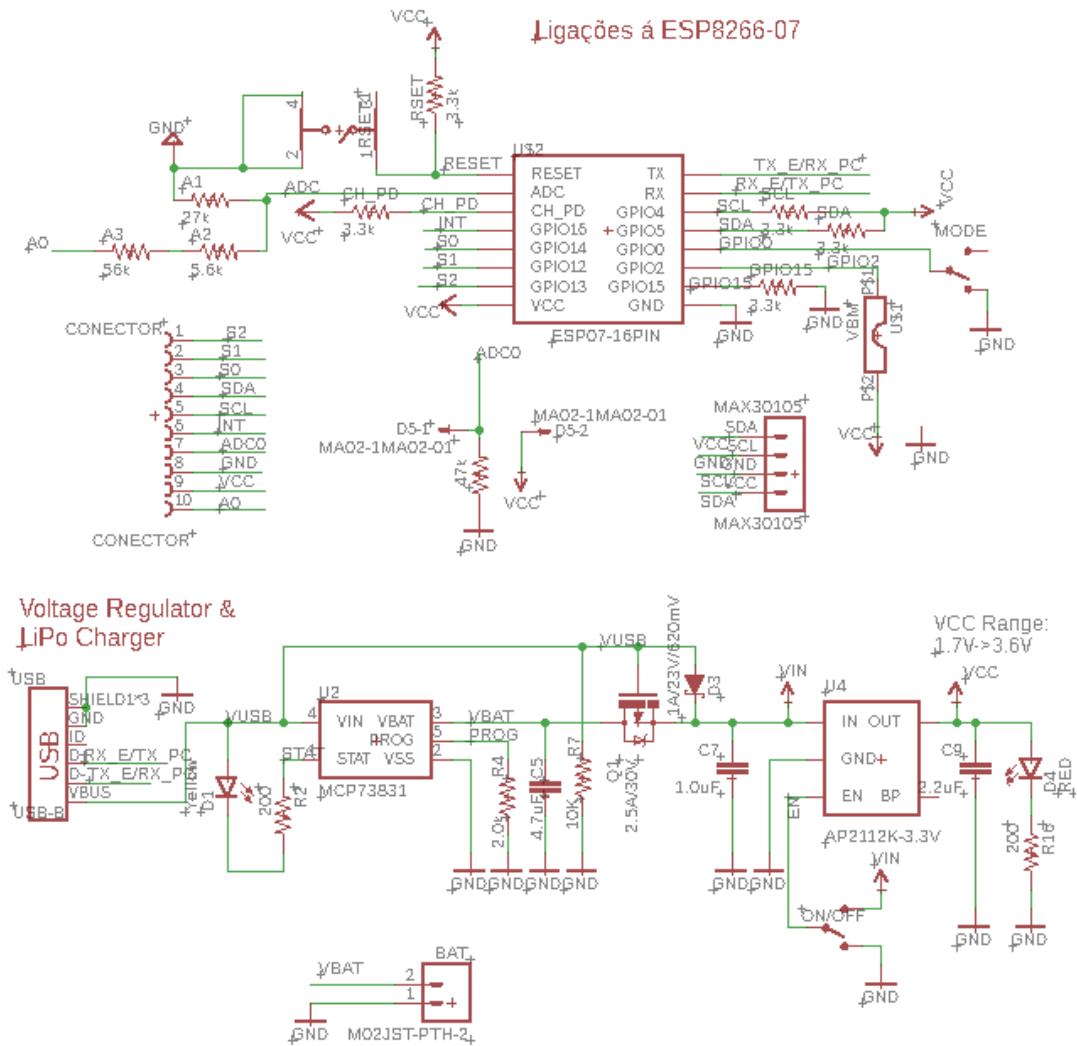


Figura 32 - Esquemático do Circuito PCB da CyberGlove - HT (parte localizada no pulso).

4.4 Módulo BNO055

O BNO055 (Figura 12) tem como finalidade fornecer a orientação absoluta da mão através da fusão dos dados dos sensores giroscópio, acelerómetro e magnetómetro. O sensor envia os seus dados inerciais para o microcontrolador Cadence Tensilica L106 através do protocolo I2C. O ESP8266 recebe a leitura dos quaterniões (w, x, z, y) e aceleração (x, y, z) do IMU, como ilustrado no exemplo seguinte.

Figura 33 - Código de leitura dos dados inerciais recebidos no ESP8266 através do barramento I2C

```

void LerBNO055()
{
  imu::Vector<3> lineacc = bno.getVector(Adafruit_BNO055::VECTOR_LINEARACCEL);
  q[5] = lineacc.x(); //aceleração no eixo do X
  q[6] = lineacc.y(); //aceleração no eixo do Y
  q[7] = lineacc.z(); //aceleração no eixo do

  imu::Quaternion quat = bno.getQuat();
  q[1] = quat.w(); // quaternion W
  q[2] = quat.x(); // quaternion X
  q[3] = quat.y(); // quaternion y
  q[4] = quat.z(); // quaternion Z
}
    
```

Para garantir o bom funcionamento do sensor é preciso efetuar as ligações de acordo com a Figura 34.

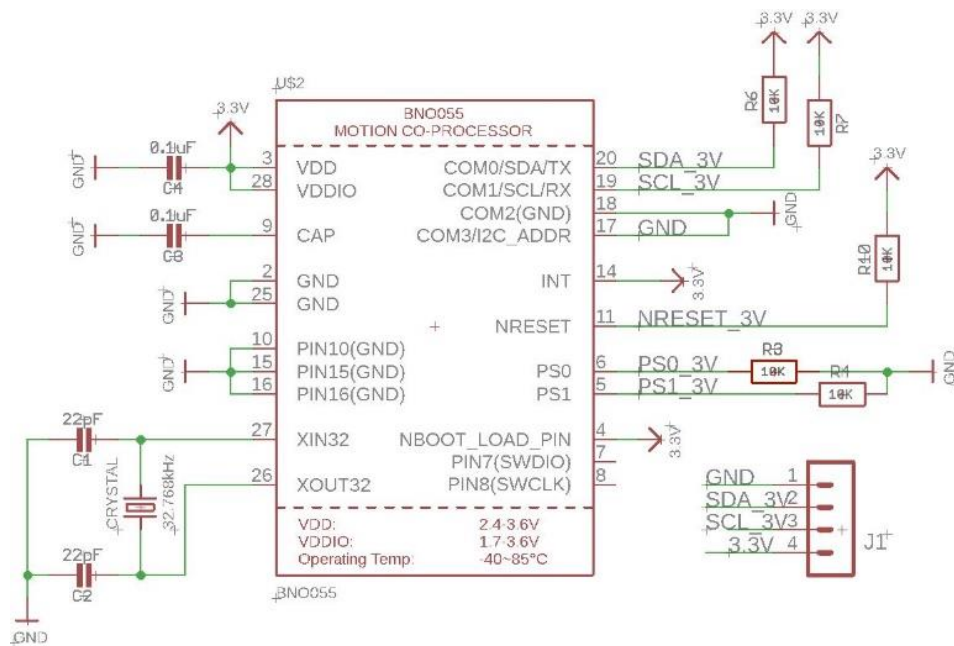


Figura 34 - Ligações do BNO055

Foram feitas várias configurações no BNO055 tais como, modo de operação, modo de energia, modo de fusão e calibração.

4.4.1 Modo de operação

O modo de operação padrão após a inicialização é *CONFIGMODE* e quando se muda para outro modo de operação, os sensores que são necessários nesse modo de sensor particular são alimentados, enquanto os sensores cujos sinais não são necessários são configurados para o modo de suspensão. A Tabela 7 lista os diferentes modos e os sinais do sensor disponíveis.

Tabela 7 - Modos de operação

Operation Mode		Available sensor signals			Fusion Data		Reg Value
		Accel	Mag	Gyro	Relative orientation	Absolute orientation	
	CONFIGMODE	-	-	-	-	-	xxxx0000b
Non-fusionmodes	ACCONLY	x	-	-	-	-	xxxx0001b
	MAGONLY	-	x	-	-	-	xxxx0010b
	GYROONLY	-	-	x	-	-	xxxx0011b
	ACCMAG	x	x	-	-	-	xxxx0100b
	ACCGYRO	x	-	x	-	-	xxxx0101b
	MAGGYRO	-	x	x	-	-	xxxx0110b
	AMG	x	x	x	-	-	xxxx0111b
	IMU	x	-	x	x	-	xxxx1000b
Fusion modes	COMPASS	x	x	-	-	x	xxxx1001b
	M4G	x	x	-	x	-	xxxx1010b
	NDOF_FMC_OFF	x	x	x	-	x	xxxx1011b
	NDOF	x	x	x	-	x	xxxx1100b

Para mudar de um modo de operação para outro é necessário garantir um tempo mínimo. Se a mudança do modo for do *CONFIGMODE* para outro modo qualquer o tempo de mínimo de comutação é de 7 ms, caso contrário o tempo de mínimo de comutação é de 19 ms. A posição de montagem do BNO055 não limita a saída de dados do dispositivo BNO055. O eixo do dispositivo pode ser reconfigurado para o novo eixo de referência.

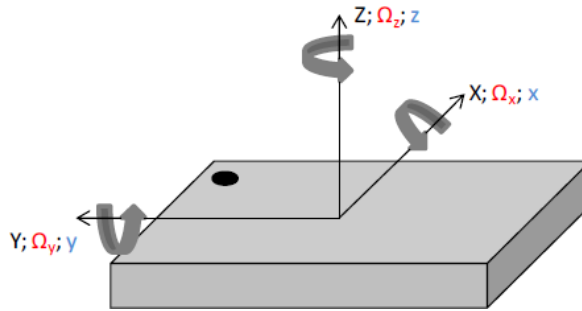


Figura 35 - Accel; Gyro; Magnet

O remapeamento do eixo é feito através da configuração do registro *AXIS_MAP_CONFIG* (Tabela 8).

Tabela 8 - *AXIS_MAP_CONFIG*

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
Reservado		Eixo Z		Eixo Y		Eixo X	
-	-	1	0	0	1	0	0

Os eixos podem ser definidos com sinal positivo ou negativo, sendo 0 positivo e 1 negativo. Para definir os sinais dos eixos tem-se de configurar o registro *AXIS_REMAP_SIGN* (Tabela 9).

Tabela 9 - *AXIS_REMAP_SIGN*

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
Reservado					Sinal do eixo Z	Sinal do eixo Y	Sinal do eixo X
-	-	-	-	-	1	1	0

4.4.2 Modos de energia

O BNO055 admite três modos de energia diferentes: modo normal, modo de baixa potência e modo de suspensão. O modo de energia pode ser selecionado por escrito no registro *PWR_MODE* conforme definido na Tabela 10. Como padrão, o BNO055 vem configurado no modo Normal.

Tabela 10 - Seleção de modos de energia

Parameter	Value	Reg Value
Power Mode	Normal Mode	xxxxxx00b
	Low Power Mode	xxxxxx01b
	Suspend Mode	xxxxxx10b

1) Modo Normal

No modo normal, todos os sensores necessários para o modo de operação selecionado (ver Tabela 7) estão sempre ligados. O mapa de registo e os periféricos internos do MCU estão sempre operacionais neste modo. Nesse modo o sensor tem um consumo de 12,3 mA.

2) Modo de suspensão

No modo de suspensão, o sistema está em pausa e todos os sensores e o microcontrolador são colocados no modo de suspensão. Nenhum valor no mapa do registo será atualizado neste modo. Para sair do modo de suspensão, o modo deve ser alterado por escrito no registo PWR_MODE (ver Tabela 7). Neste modo o consumo é de 0.04mA.

3) Modo de baixa potência

Se nenhuma atividade (ou seja, não há movimento) for detetada por uma duração configurável (5 segundos padrão), o BNO055 entra no modo de baixa energia consumindo um corrente de 0.4mA. Neste modo, apenas o acelerómetro está ativo. Uma vez que o movimento é detetado (isto é, o acelerómetro sinaliza uma interrupção de qualquer movimento), o sistema é despertado e o modo normal é inserido, este foi o modo de energia escolhido para o projeto. O modo de baixa potência não é aplicável quando o acelerómetro não é utilizado.

O tempo de duração de não movimento ou de movimento lento é configurado no registo AC_NM_SET (Tabela 11).

Tabela 11 - AC_NM_SET

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
-	0	1	0	0	1	1	1
Reservado	Slo_no_mot_dur <6:1>						SMNM

Se o bit 0 (SMNM) for configurado a 1 deteta quando há movimentos lentos e 0 deteta quando não há movimentos. Os bits 1 a 6 são referentes ao intervalo limite de tempo em que não há movimentos ou movimentos lentos.

Tabela 12 - Períodos de tempo limite sem movimento

slo_no_mot_dur	Delay time	slo_no_mot_dur	Delay time	slo_no_mot_dur	Delay time
0	1 s	16	40 s	32	88 s
1	2 s	17	48 s	33	96 s
2	3 s	18	56 s	34	104 s
...	...	19	64 s
14	15 s	20	72 s	62	328 s
15	16 s	21	80 s	63	336 s

Nota: Os valores de *slo_no_mot_dur* 22 a 31 não são especificados.

4.4.3 Modo de Fusão

O modo NDOF foi o modo configurado no sensor, porque entre os modos de fusão com orientação absoluta é o que se adequa às necessidades do projeto, visto que o modo COMPASS é normalmente utilizado para calcular a direção do ponteiro da bússola e este modo utiliza apenas as componentes horizontais x e y. Não foi escolhido o modo NDOF_FMC_OFF mesmo tendo as mesmas características do modo NDOF porque este modo tem a calibração rápida do Magnetómetro desativada.

O modo NDOF é um modo de fusão com 9 graus de liberdade onde os dados de orientação absoluta fundidos são calculados a partir de acelerômetro, giroscópio e o magnetómetro. As vantagens de combinar os três sensores são um cálculo rápido, resultando em alta taxa de dados de saída e alta robustez das distorções do campo magnético.

4.4.4 Calibração

O BNO055 deve ser calibrado antes da sua utilização. Uma vez calibrado, os deslocamentos de calibração podem ser gravados no sensor permitindo assim o sensor estar

pronto para ser utilizado na próxima vez que for ligado. Os dados de deslocamento e raio são lidos a partir desses registos e armazenados no sistema *host*, que podem ser utilizados mais tarde para obter os dados de orientação corretos após '*Power on Reset*' do sensor.

Embora o *software* de fusão dos sensores execute o algoritmo de calibração de todos os três sensores (acelerómetro, giroscópio e magnetómetro) em segundo plano para remover os deslocamentos, algumas etapas preliminares devem ser asseguradas para que esta calibração automática ocorra. O acelerómetro e o giroscópio são relativamente menos suscetíveis a distúrbios externos, pelo que o deslocamento é insignificante. Considerando que o magnetómetro é suscetível ao campo magnético externo e, portanto, para garantir a precisão correta da orientação, as etapas de calibração descritas abaixo devem ser executadas. Dependendo dos sensores selecionados, os seguintes passos tiveram que ser executados após cada '*Power on Reset*' para a calibração adequada do dispositivo.

1) Calibração do Acelerómetro

- Colocou-se o sensor em 6 diferentes posições estáveis por um período de poucos segundos para permitir que o acelerómetro seja calibrado;
- Faze-se um movimento lento entre 2 posições estáveis;
- As 6 posições estáveis podem estar em qualquer direção, mas o sensor deve estar deitado pelo menos uma vez perpendicularmente ao eixo x, y e z;
- Fez-se a leitura do registo *CALIB_STAT* para verificar o estado de calibração do acelerómetro.

2) Calibração do Giroscópio

- Colocou-se o sensor numa única posição estável por um período de alguns segundos para permitir que o giroscópio calibre;
- Fez-se a leitura do registo *CALIB_STAT* para verificar o estado da calibração do giroscópio.

3) Calibração do Magnetómetro

Com o sensor no modo *NDOF*, fez-se alguns movimentos aleatórios (por exemplo: escrever o número '8') até o registo *CALIB_STAT* indicar totalmente calibrado.

Depois do sensor estar calibrado, o perfil de calibração pode ser reutilizado para obter os dados de orientação corretos imediatamente após 'Power of Reset' (antes de passar pelas etapas mencionadas na seção acima). No entanto, uma vez que o sensor entra na rotina de calibração interna, o perfil de calibração é substituído pelos deslocamentos do sensor recém-obtidos e pelo raio do sensor. É importante que os deslocamentos corretos e o raio de sensor correspondente sejam usados. Deslocamentos incorretos podem resultar em dados de orientação não confiáveis. Para definir o perfil de calibração, deve-se executar as seguintes etapas:

- i. Mudar o modo de operação para *CONFIG_MODE*;
- ii. Escrever os deslocamentos do sensor correspondentes e os dados do raio;
- iii. Alterar o modo de operação para o modo de fusão.

A Figura 36 representa o fluxograma da calibração o sensor BNO055.

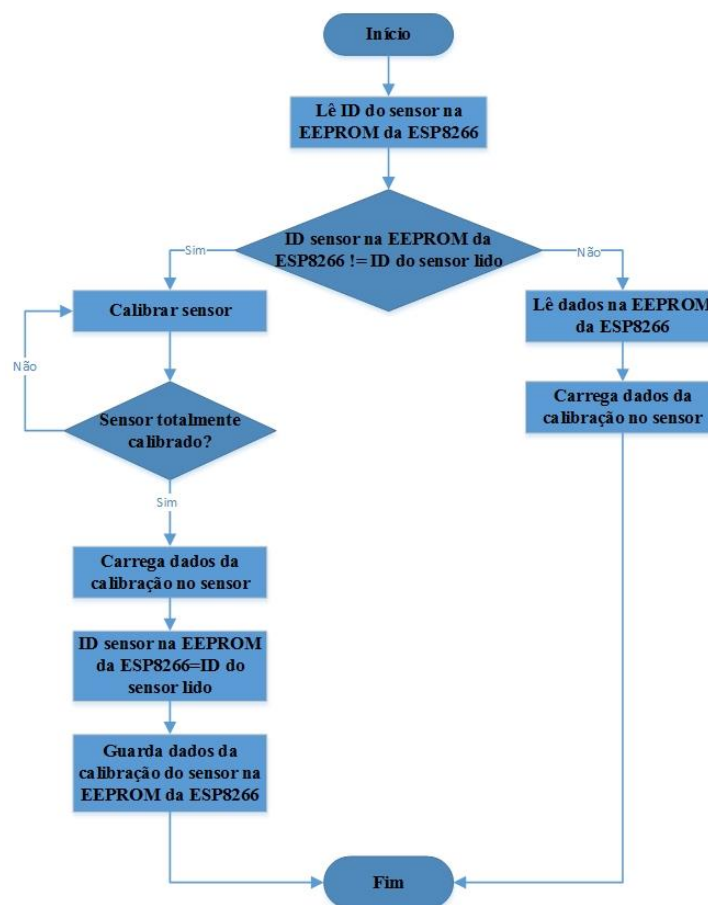


Figura 36 - Fluxograma da Calibração do BNO055

4.5 Flex Sensor

O flex sensor (Figura 13) é utilizado para medir o ângulo da curvatura dos dedos através leitura do valor da resistência do sensor, o valor da resistência aumenta á medida que o sensor se dobra (fechar os dedos). A tensão variável é lida pelo conversor analógico-digital do microcontrolador do ESP8266 e aí realizado o cálculo do ângulo da curvatura dos dedos Foram utilizados cinco sensores um para cada dedo, conforme ilustrado na Figura 37.

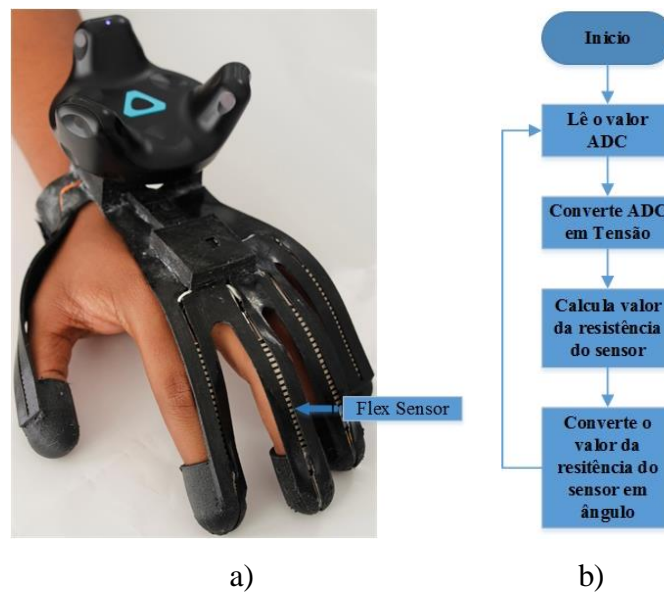


Figura 37 - a) Posicionamento do sensor flexível; b) Fluxograma do cálculo do ângulo da curvatura dos dedos

4.6 Feedback háptico através de um vibro-motor

Para fornecer um feedback háptico, foi utilizado um estímulo vibratório realizado através da utilização de um pequeno vibro-motor que promove uma vibração a partir da rotação de uma massa descentrada. O vibro-motor está conectado a uma saída PWM (*Pulse Width Modulation*) do microcontrolador que regula a intensidade da vibração.

O feedback através de vibração é usada em vários contextos: 1) proximidade de objetos (a intensidade de vibração do motor aumenta à medida que a distância da CyberGlove - HT para o obstáculo diminui); 2) interação com objetos virtuais (e.g., objetos, menus) ou reconhecimento de gestos físicos (toque entre dois dedos sentida através de

sensores de força que medem a pressão). Este vibro-motor (Figura 38) apresenta dimensões muito reduzidas (10 mm de diâmetro e 3,4 mm de espessura) não representando um grande acréscimo no peso para o protótipo da CyberGlove - HT.



Figura 38 - vibro-motor

A Tabela 13 apresenta algumas características do vibro-motor utilizado.

Tabela 13 - Características do vibro-motor

Velocidade de Rotação Nominal	12200 rpm
Corrente Nominal de funcionamento	63mA
Tensão mínima	1.4 V
Tensão máxima de funcionamento	3.6 V

4.7 Sensor de força: FSR402

Foi colocado um sensor na extremidade de cada um dos 3 dedos do meio (ver Figura 39), para detetarem a existência de força aplicada nesses dedos e fornecer informação para o feedback háptico. Nomeadamente no contacto com objetos físicos, em contexto de realidade mista, ou contacto entre dedos para identificação de ações, para interação com menus, substituindo os botões do controlador, ou para reconhecimento de gestos.

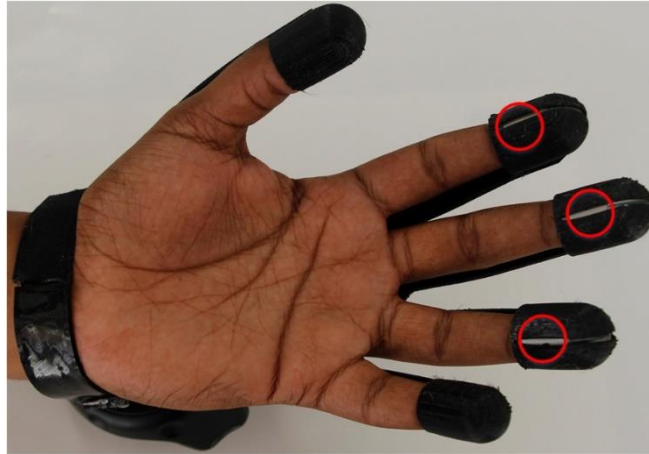


Figura 39 - Posicionamento dos sensores FSR 402 na CyberGlove - HT

4.8 Medição de distâncias: sensor VL53L0X

O sensor VL53L0X (Figura 20) foi colocado nas costas da mão do utilizador com o objetivo de detectar possíveis obstáculos que venham a aparecer. Sempre que a distância entre a mão e o obstáculo for inferior à distância de segurança é ativado o vibro motor fornecendo assim um *feedback* háptico e desativado caso seja superior.

As zonas de alcance do sensor foram divididas em 4 zonas, sendo que duas dessas zonas estão definidas pelo limite do alcance do sensor (Figura 40) e as outras duas zonas foram programadas. A zona invisível e a zona fora são as zonas delimitadas pelo alcance mínimo e máximo do sensor, pois este sensor mede distância no máximo até 1.2 metro e não consegue efetuar boas medições para distância inferiores a 40 milímetros.

Tabela 14 - Zonas de alcance do VL53L0X

zonas	distância mínima (mm)	distância máxima (mm)
zona invisível	...	<50
zona de alerta	≥ 50	<200
zona segura	≥ 200	≤ 1200
zona fora de alcance	>1200	...

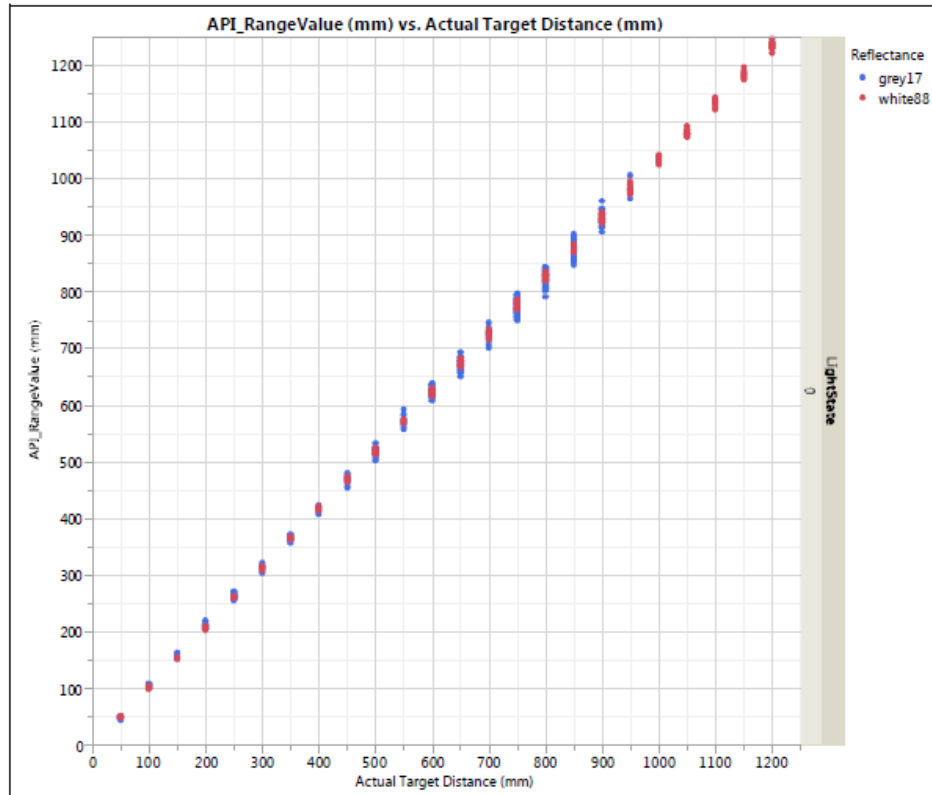


Figura 40 - Alcance e precisão do VL53L0X por defeito

4.9 MAX30105

O batimento cardíaco é detetado através do sensor Max30105 e foi utilizado neste projeto com o intuito de fornecer informações que podem ser usadas para avaliar o envolvimento emocional do utilizador, por exemplo, para alterar a dinâmica da aplicação.

O processamento do batimento cardíaco lido pelo sensor PPG (MAX30105) é processado no microcontrolador do ESP8266. As leituras de batimento cardíaco acima de 180bpm e abaixo de 30bpm foram rejeitadas com o intuito de reduzir o erro das leituras do sensor.

Figura 41 - Leitura do batimento cardíaco

```

void BPM() {
  irValue = particleSensor.getIR();
  if (checkForBeat(irValue) == true && irValue > 50000) { // se detectou um batimento
    beatsPerMinute = 0;
    long delta = t - lastBeat;
    lastBeat = t;
    beatsPerMinute = 60 / (delta / 10.0);
    if (beatsPerMinute < 180 && beatsPerMinute > 30) {
      rates[rateSpot++] = (byte)beatsPerMinute; //Armazena esta leitura na matriz
      rateSpot %= RATE_SIZE;
    }
  }
}

```

A cada pico do batimento é gerada uma interrupção no MAX30105 e este envia essa ocorrência via I2C para o ESP8266. Para se medir o intervalo de tempo entre dois batimentos cardíacos, utilizou-se o Timer1 (o Timer0 é utilizado pelo módulo WiFi) do ESP8266 para definir uma base de tempo de 100 ms, sendo o valor final correspondente a um múltiplo deste valor.

Cálculos efetuados para base de tempo do TIMER1

$F_{osc} = 80\text{MHz}$, $PS=16$

$$T_{osc} = \frac{1}{80 * 10^6} = 12,5 * 10^{-9}$$

$$Tick = T_{osc} * PS = 12,5 * 10^{-9} * 16 = 2 * 10^{-7}$$

$$1Tick \leftrightarrow 2 * 10^{-7}$$

$$xTick \leftrightarrow 0,1$$

$$xTick = \frac{0,1}{2 * 10^{-7}} = 500000$$

Código

- Configurações do TIMER1 e função de interrupção

```

timer1_attachInterrupt(onTimerISR); // ativa as interrupções do timer1
timer1_enable(TIM_DIV16, TIM_EDGE, TIM_SINGLE); //configurações do timer1
timer1_write(500000); // 100 ms periodo da interrupção

void ICACHE_RAM_ATTR onTimerISR() { // função é chamada sempre que passar 100 ms
  t++;
  timer1_write(500000); //100ms
}

```

A leitura do batimento cardíaco é baseada na leitura de 4 amostras válidas de bpm, sendo depois feita uma média de bpm e do desvio padrão.

```

for (byte x = 0 ; x <= RATE_SIZE - 1 ; x++) {
    m1 += rates[x];
}
m1 = m1 / RATE_SIZE ;

for (int i = 0; i < RATE_SIZE; i++) {
    dif[i] = rates[i] - m1;
    dif[i] = dif[i] * dif[i];
    soma_dif = soma_dif + dif[i];
}
dp = soma_dif / (RATE_SIZE - 1);
dp = sqrt(dp);

m2 = 0;
for (int i = 0; i < RATE_SIZE; i++) {
    if (rates[i] >= m1 - dp && rates[i] <= m1 + dp) {
        m2 = (m2 + rates[i]); //soma os bpm
        count_bpm++;
    }
}
m2 = m2 / count_bpm;

```

O cálculo do desvio padrão tem como objetivo rejeitar os valores de bpm que sejam inferiores a média - desvio padrão e superiores á media + desvio padrão, e calcular uma nova média do bpm. Essa nova média do bpm é que é considerada o valor atual do batimento cardíaco.

4.10 Multiplexagem dos sensores analógicos

Dada a limitação de entradas analógicas do microcontrolador Cadence Tensilica L106, foi usado o multiplexer analógico de 8 canais, 74HC4051 [34]. O multiplexer analógico possui três entradas de seleção digital (S0, S1 e S2), oito entradas analógicas independentes (Yn) e uma saída comum (Z). As entradas de seleção estão ligadas aos pinos digitais do microcontrolador, nas oito entradas analógicas estão ligados 5 flex sensor e 3 sensores FSR 402 e a saída comum está ligada a entrada analógica do microcontrolador (ver Figura 42).

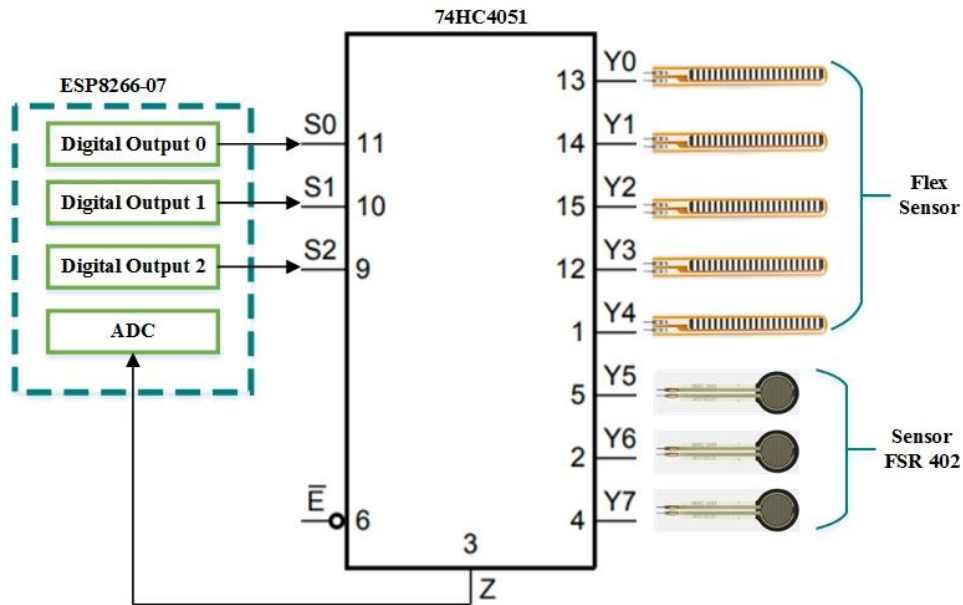


Figura 42 - Ligações do multiplexor analógico

4.11 Bateria e circuito de gestão da bateria

Foi usada uma bateria de lítio (LiPo) recarregável de 3,7V que consegue fornecer até 1050 mAh. Esta bateria alimenta todos os componentes eletrônicos da CyberGlove - HT e foi escolhida devido ao seu tamanho e peso reduzido.



Figura 43 - Bateria LiPo

O circuito da Figura 44 corresponde ao carregamento da bateria LiPo em que a bateria é recarregada usando a tensão de um conector USB, nominalmente de 4.5 a 5.2 V, o VBUS da USB está conectado ao pino VIN do controlador de carregamento MCP73831 [35]. O MCP73831 possibilita programar a corrente de carga entre 15 mA a um máximo de 500 mA. Nesta implementação conectou-se uma resistência de 2 k Ω ao pino 5, o que resulta em uma corrente de carga de 500 mA. Para além de carregar a bateria o circuito tem dois

LEDs (1 vermelho, 1 verde) que indicam o estado da bateria. O LED vermelho quando está ligado indica que a CyberGlove - HT está ligada, e o LED verde quando ativo indica que a bateria está sendo carregada, assim que a bateria esteja totalmente carregada o LED desliga.

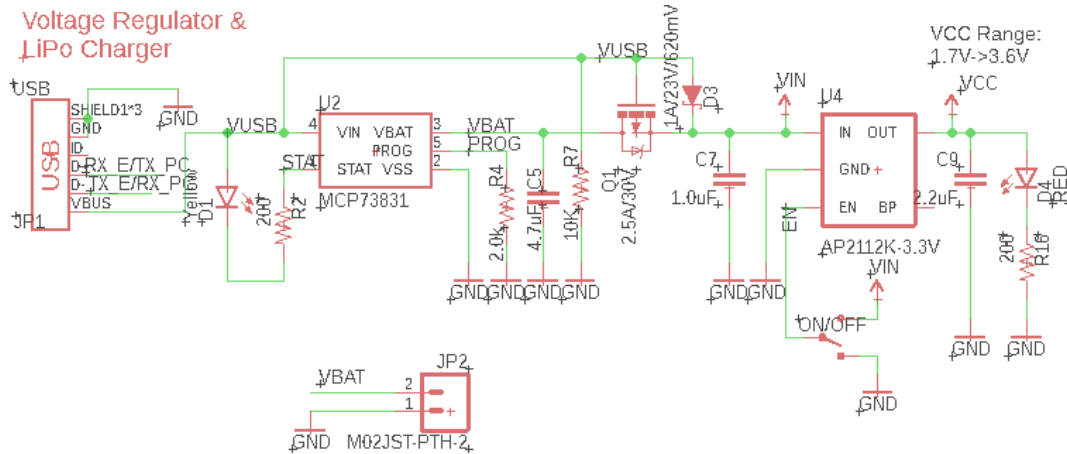


Figura 44 - Circuito de carregamento da bateria

4.12 Comunicação CyberGlove - HT-Unity

A ESP8266 envia para a aplicação desenvolvida no *Unity*, via UDP/IP, as seguintes informações, identificação da mão (direita (1)/esquerda (0)), dados do IMU (quaterniões, acelerações), valor de batimento cardíaco (bpm), a distância em milímetros do sensor de distância (VL53L0X), os ângulos de curvatura dos dedos (os valores variam entre 0° (dedo estendido) e 180° (dedo totalmente dobrado)) e informação se há ou não força exercida nas pontas dos 3 dedos do meio (1-pressão, 0-Sem pressão). Os dados do pacote são enviados segundo a Tabela 15:

Tabela 15 - Ordem dos dados do pacote

Pacote																	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Mão	Quaterniões			Acelerações			BPM	Distância	Ângulo de curvatura dos dedos					Sensor de força			
Esq/Drt	W	X	Y	Z	X	Y	Z	bpm	mm	Dedo 1	Dedo 2	Dedo 3	Dedo 4	Dedo 5	Dedo 2	Dedo 3	Dedo 4

Para configurar a comunicação Wifi alguns parâmetros foram previamente definidos com os seguintes valores.

Figura 45 - Parâmetros para configuração da ESP8266-07

```

WiFiUDP Udp; // Objeto UDP
IPAddress ip(192, 168, 0, **); // Endereço IP
IPAddress gateway(192, 168, 0, 1); // Endereço da gateway
IPAddress subnet(255, 255, 255, 0); // Endereço da máscara da subnet
const char* ssid = "VITA-HTPDIR_2.4G"; // Nome do servidor
const char* password = "*****"; // Password do servidor
unsigned int localUdpPort = 4210; // Numero da porta local

```

Na função *setup()* do programa definiu-se esta ESP8266-07 como *station*, com o respectivo endereço IP, endereço da *gateway* e da máscara da sub-rede. Para terminar as configurações, ativou-se o porto UDP que envia os dados.

Figura 46 - Configuração da ESP8266-07 como servidor station

```

WiFi.mode(WIFI_STA);
WiFi.config(ip, gateway, subnet);
WiFi.begin(ssid, password); // Inicialização da ligação Wifi
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) //verificação da conexão Wifi
{
  delay(500);
  Serial.print(".");
}
Serial.println(" conectado");
Udp.begin(localUdpPort); //Inicializa a biblioteca Wi-Fi UDP
//e as configurações de rede, escutando a porta

```

A Figura 47 apresenta o fluxograma do programa principal com o objetivo de explicar o funcionamento geral do *software* da CyberGlove - HT. A CyberGlove - HT depois de efetuar a leitura dos dados adquiridos dos sensores I2C e analógicos, envia esses dados via WiFi para a aplicação no Unity.

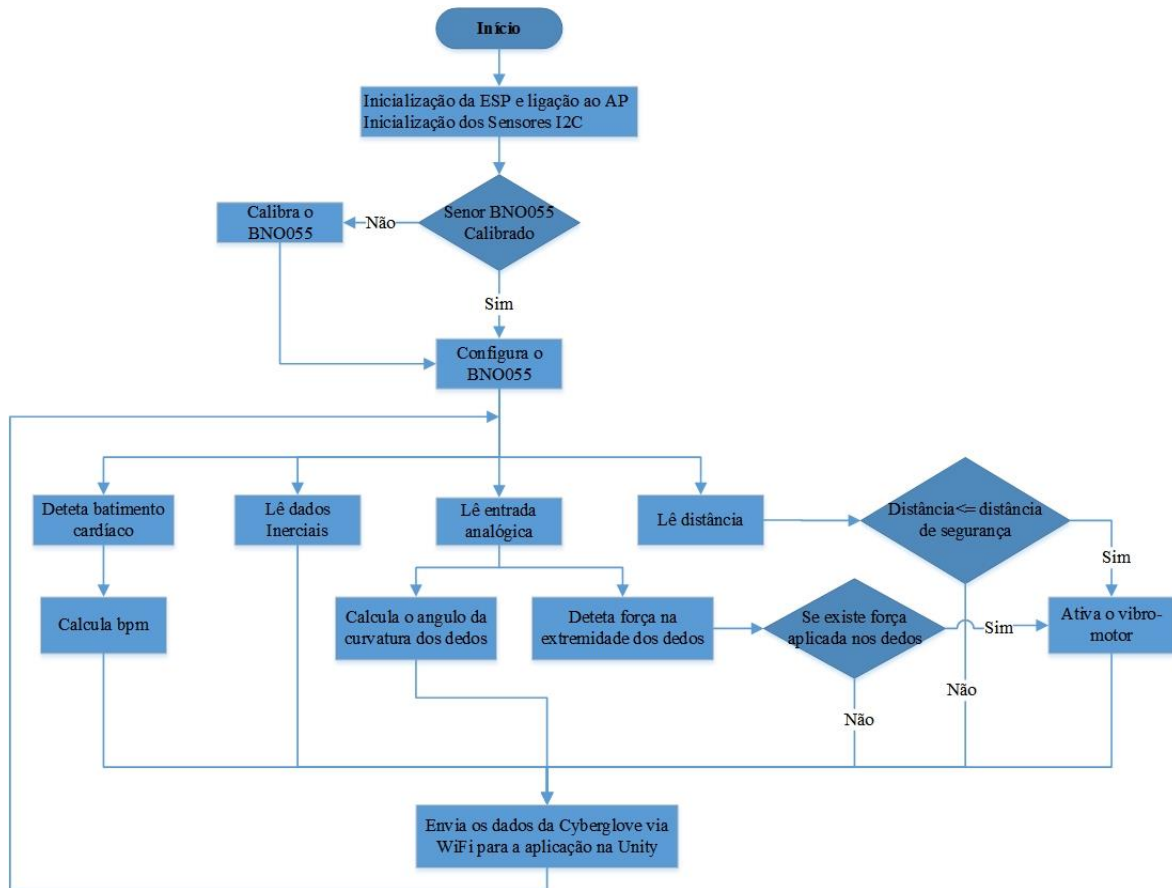


Figura 47 - Fluxograma do programa principal

4.13 Modelação 3D da CyberGlove - HT

Para a conceção da luva vestível foram realizadas vários modelos que permitiram aferir a adequação de tamanho, colocação de sensores, etc. A luva foi desenhada no SolidWorks, com as dimensões médias de uma mão humana e posteriormente impressa na impressora 3D Sigma BCN3D. O material de impressão utilizado foi o FilaFlex, um material muito resistente e flexível (alongamento na rutura - 665%) que proporciona uma boa sensação de encaixe manual. A palma da mão é livre, o que é bastante importante para as experiências de realidade mista. A Figura 48 mostra algum dos modelos 3D realizados.

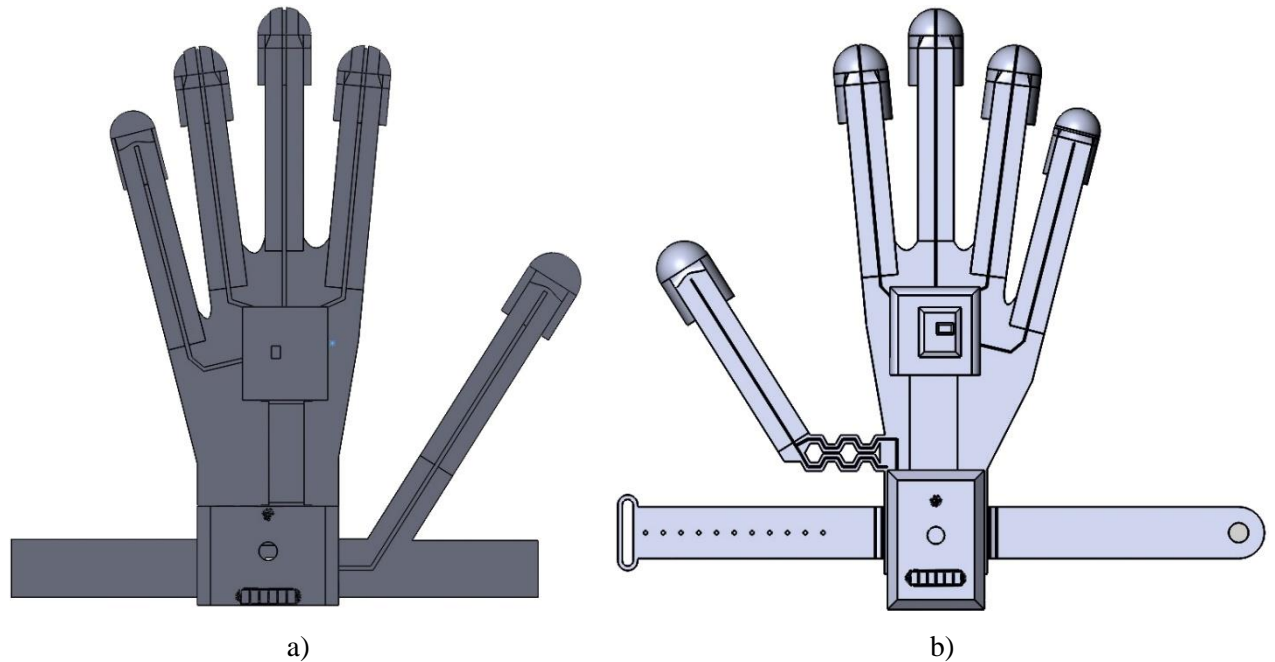


Figura 48 - Desenho da CyberGlove - HT no SolidWorks; a) CyberGlove - HT da mão esquerda; b) CyberGlove - HT da mão direita

4.14 Modos de funcionamento da CyberGlove - HT

A CyberGlove - HT tem dois modos de funcionamento, modo de funcionamento normal e modo de suspensão. A transição entre o modo de funcionamento normal e o modo de suspensão é feita através de *software*. Como toda a CyberGlove - HT é alimentada por uma bateria, e para prolongar a vida útil da mesma, programou-se alguns dos módulos para entrarem em modo suspensão (Modo *Sleep*) sempre que não estivessem a ser utilizados. Em modo de funcionamento normal todos os sensores estão ativos e o consumo da CyberGlove - HT é cerca de 100 mA, sendo que no modo de suspensão o consumo é mais baixo, aproximadamente 30 mA.

4.15 Circuito impresso PCB para componentes SMD

As placas de circuito impresso são numa materialização do desenho 2D que contém as ligações elétricas entre os vários componentes eletrónicos constituintes do circuito numa

placa com pistas de cobre. A criação destas placas permitiu a miniaturização dos sistemas elétricos/eletrônicos, tendo o seu desenvolvimento passado por cinco etapas principais:

- Desenho do esquema de ligações do circuito;
- Passagem do desenho esquemático para desenho CAD;
- Fabrico da placa de circuito impresso;
- Soldagem dos componentes na placa de circuito impresso;
- Teste de ligações.

O desenho 2D da placa de circuito impresso foi efetuado no *software* EAGLE 9.5.1. Este software possui um editor que disponibiliza duas funcionalidades distintas: criação de desenhos dos esquemas de ligação do circuito e criação de desenhos da placas de circuito impresso, estando as duas interfaces de edição interligadas entre si. Desta forma é possível desenhar o esquema do circuito e carregar esse circuito para o layout de desenho da placa, onde são dispostos todos os componentes utilizados no esquema e são indicadas as ligações por efetuar através de “airwires”.

4.16 Tracker 3D

Usando engenharia inversa do sistema HTC Vive, desenvolveu-se um tracker 3D para ter as mesmas funcionalidades do tracker do pulso, mas com menor dimensão. Uma vez que o sistema ficou funcional apenas parcialmente, optou-se por remeter esse desenvolvimento para o Anexo-D (consultar também Anexo C para fundamentação).

5 Resultados

Este capítulo descreve os resultados com destaque para os protótipos finais alcançados, bem como aos resultados experimentais de validação dos sensores e aos resultados experimentais em contextos de realidade imersiva.

5.1 Protótipos desenvolvidos

Ao longo do projeto foram realizados vários protótipos que integraram várias versões de montagens de circuitos eletrônicos e de modelação das luvas.

5.1.1 Protótipo 1 (inicial)

O protótipo inicial consistiu numa bracelete (Figura 49) que foi usada principalmente para validar o IMU e a comunicação Wi-Fi (foi chamada de WristMov). A bracelete possuía apenas um módulo ESP8266 e um BNO055 alimentado por uma bateria LiPo. Os dados inerciais eram enviados via WiFi para uma aplicação desenvolvida em Processing. A aplicação permitia ao utilizador visualizar os movimentos de rotação do seu pulso em tempo real, usando um modelo3D rígido da” mão+pulso”.

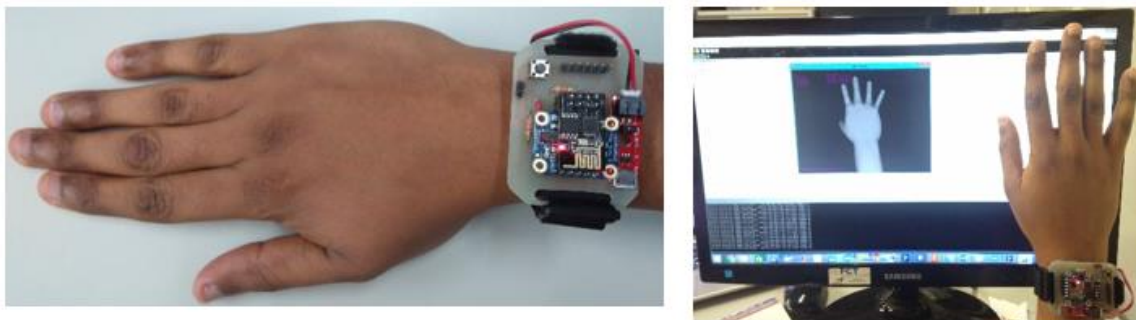


Figura 49 - Bracelete WristMov (Protótipo 1)

5.1.2 Protótipo 2

No segundo protótipo, passou-se da bracelete para uma luva de tecido, designada de CyberGlove - HT V0.1 (Figura 50). Nesta versão o sensor inercial foi colocado nas costas da mão, passando assim a mapear os movimentos da mão em vez do pulso. Esta versão possuía todas as funcionalidades da primeira, às quais foram acrescentados mais dois sensores, um para detecção do batimento cardíaco e um sensor de distância de obstáculos na sua proximidade. A luva possui ainda um vibro-motor ativado sempre que a distância a obstáculos está abaixo de um valor predefinido.



Figura 50 - CyberGlove - HT V01

5.1.3 Protótipo 3

O protótipo 3, chamado de CyberGlove - HT V02, foi desenvolvido com o intuito de fornecer a percepção dos movimentos dos dedos. A luva de tecido foi substituída por um modelo impresso em 3D (Figura 51) ao qual foram incorporados os sensores Flex Sensor (Spectra Symbol 2.2) para fornecer o ângulo da curvatura do dedo (esta versão apenas contemplava o movimento de um dos dedos). Esta versão foi projetada de forma a o utilizador ter a palma da mão livre dando assim uma maior sensação de imersão e possibilidade de toque em objetos reais.



Figura 51 - CyberGlove - HT V02

5.1.4 Protótipo 4

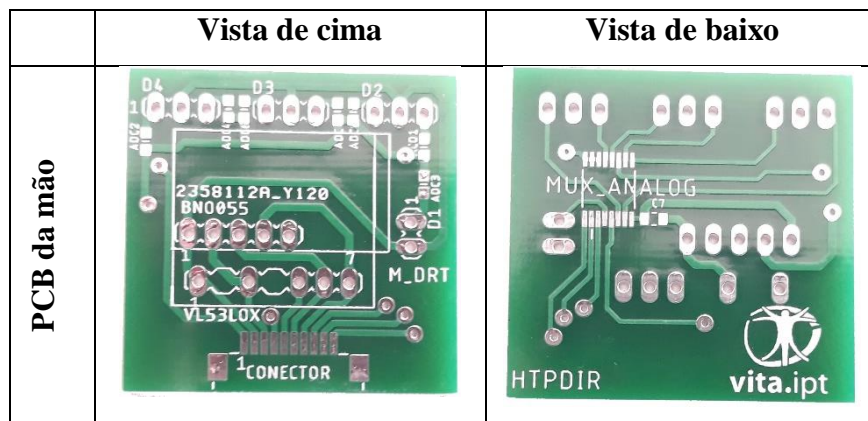
A versão CyberGlove - HT V03 (Figura 52) foi projetada com a finalidade de melhorar a estética da luva, fornecer um melhor conforto da luva na mão e permitir a colocação de um tracker no pulso, passando assim a detetar-se os movimentos de rotação da mão, mas também os movimentos do pulso e a sua posição absoluta. Com estas duas componentes (mão + pulso) espera-se uma sensação superior de *embodiment* no ambiente imersivo. Na componente de eletrónica foi acrescentado o circuito de controlo do carregamento da bateria, e passou a integrar sensores de curvatura em todos os dedos. As placas de circuito impresso desenvolvidas para esta versão da CyberGlove - HT são composta unicamente por componentes SMD (*Surface Mount Devices*) possibilitado assim uma diminuição do tamanho da PCB.



Figura 52 - CyberGlove - HT V03

5.2 Placas de Circuito Impresso

O circuito eletrónico completo foi desenhado em Eagle e impresso em PCB para montagem com componentes SMD. A Figura 53 mostra as placas desenvolvidas depois de um processo iterativo. A versão inicial foi ajustada até chegar à versão final que são placas de dupla face (várias versões de PCBs foram desenvolvidas para as diferentes versões da CyberGlove - HT). Na Figura 54 representa-se a versão final já com todos os componentes inseridos.



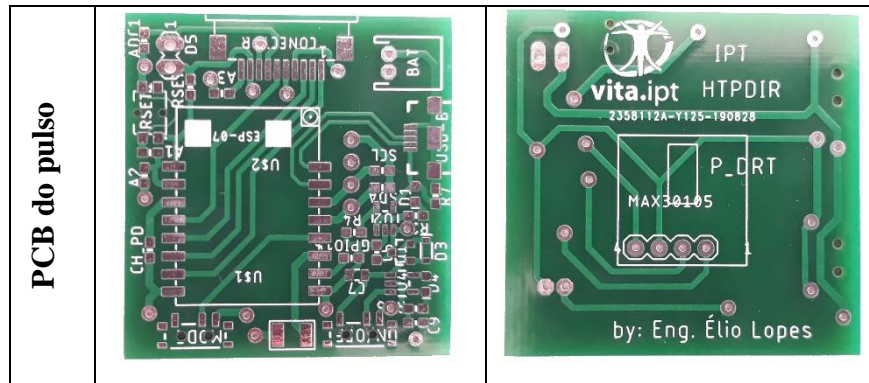


Figura 53 - PCBs finais

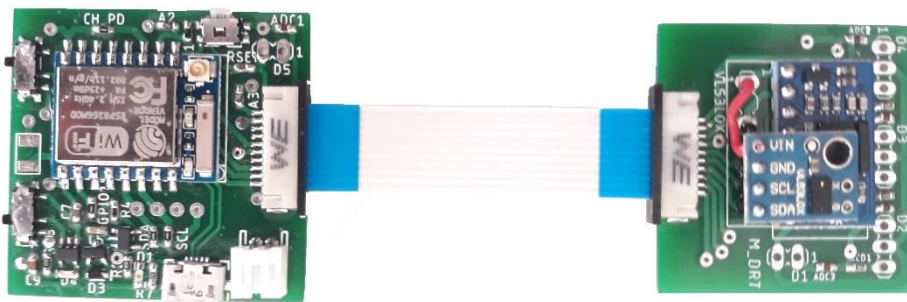


Figura 54 - Versão final das PCBs com os todos os componentes

5.3 Testes de validação dos sensores da CyberGlove - HT

Todos os sensores foram testados experimentalmente de forma isolada, nomeadamente IMU (BNO055), Flex Sensor, MAX30105, VL53L0X e FSR402

5.3.1 Dados inerciais: sensor BNO055

Na Figura 55 pode-se visualizar as posições do modelo virtual em Unity e a posição real correspondente. Verificou-se que o posicionamento é muito exato quando comparado com medição manual (fita métrica). As experiências realizadas em contexto de realidade imersiva complementam esta validação.

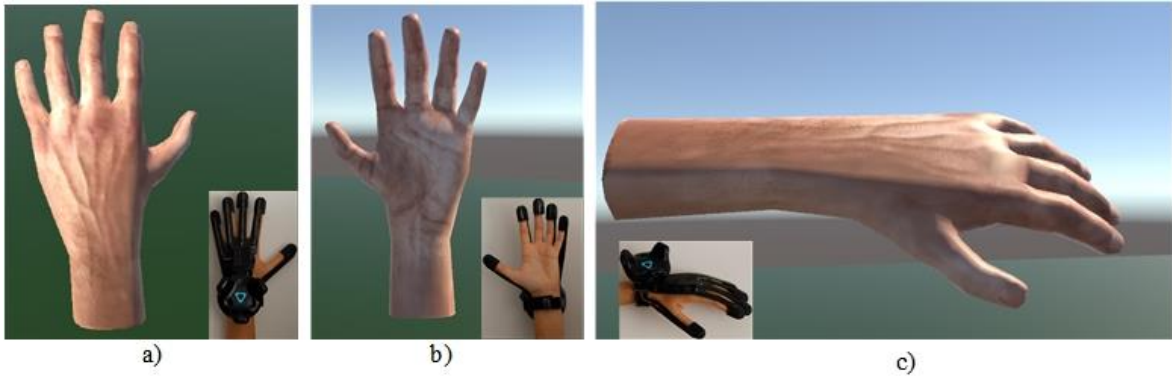


Figura 55 - Teste da orientação da mão

5.3.2 Sensor de curvatura

Na Figura 56 pode-se visualizar os movimentos dos dedos a serem reproduzidos na aplicação Unity.

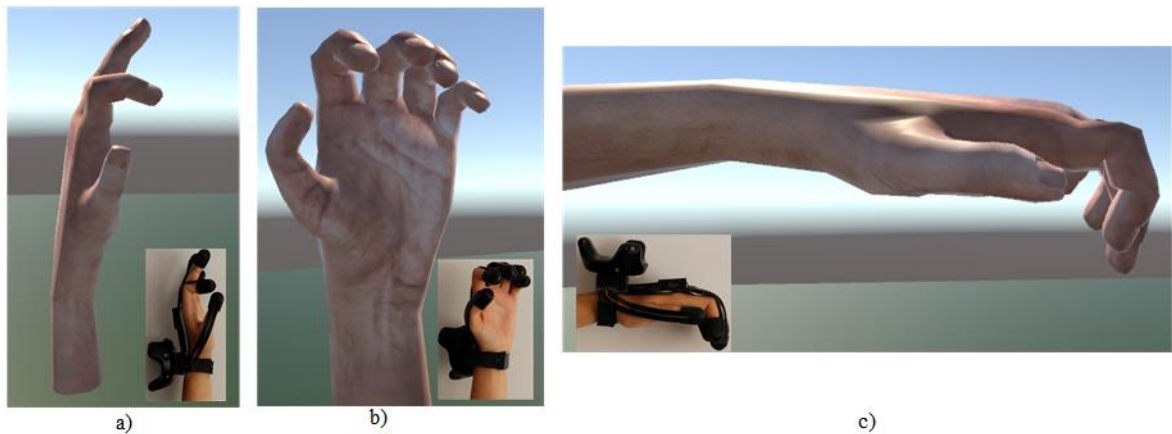


Figura 56 - Teste da posição dos dedos

5.3.3 Sensor de batimento cardíaco: MAX30105

A Figura 57 mostra os resultados obtidos com a leitura do sensor MAX30105 comparando-as com a do sensor SPO2 da MySignals (mede a saturação do oxigênio no sangue e o batimento cardíaco no dedo). Medições realizadas em contexto experimental (Figura 58) permitem-nos concluir que os valores devolvidos pelos dois sensores é muito

aproximada apresentando um desvio padrão de 5.48 bpm, conforme se pode observar na Figura 57.

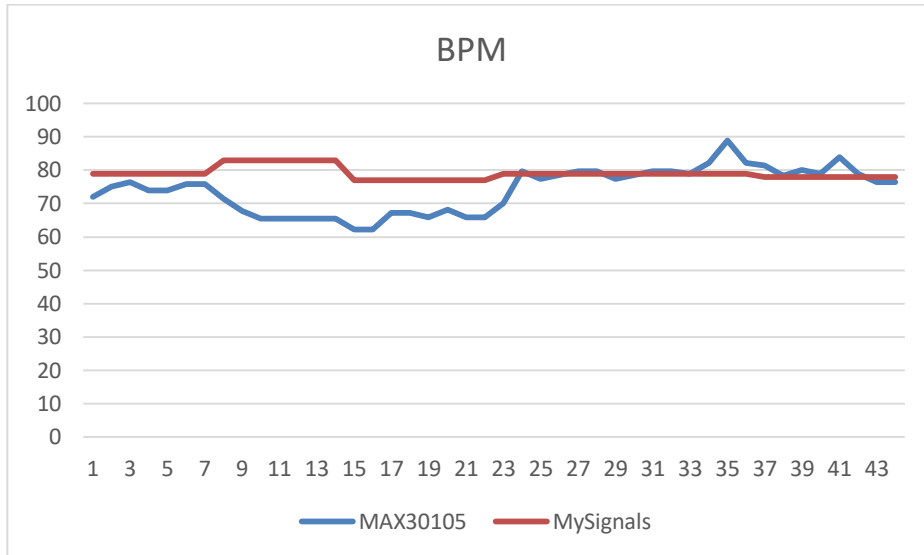


Figura 57 - Comparação do Sensor MAX30105 e MySignals na medição do BPM



Figura 58 - Testes do sensor MAX30105 em contexto experimental.

5.3.4 Sensor de distância

O sensor VLX53L0X tem um campo de visão de 25°, ou seja só consegue detectar obstáculos que estejam dentro deste campo de visão caso contrário os objetos não são detectados. Dos sucessivos testes realizados o sensor conseguiu detectar 100% dos obstáculos que estavam dentro do seu campo de visão, o sensor conseguiu detectar objetos tais como porta de madeira e de vidro, garrafa de água e até fio de cabelo.

5.3.5 Sensor de força

Os sensores de força colocados nas extremidade dos dedos não conseguem detetar pequenas forças exercidas nos dedos, sendo necessário exercer alguma força o que se deve aos dedos da luva terem uma espessura de 1.88 mm.

5.4 Testes de consumo e tempo de duração da bateria

A medição do consumo da bateria que alimenta a CyberGlove - HT foi feita através do contador de Coulomb LTC4150 (Figura 59). O LTC4150 possui um pino de saída chamado interrupção (INT), normalmente no estado alto, que passa a baixo cada vez que 0.614 coulombs passam pelo dispositivo (0.1707mAh ou 0.0001707 Ah). O outro pino é o pino POL que recebe um sinal de "polaridade" informando assim em qual direção a corrente está fluindo. Contando os pulsos e a direção através do Arduino Mega (Figura 60), tem-se uma contagem precisa da quantidade de energia que o circuito está removendo ou colocando na bateria.

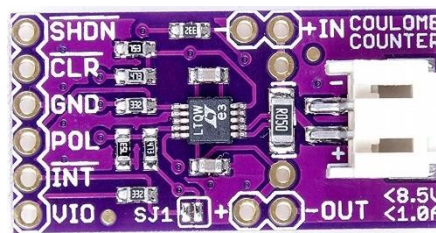


Figura 59 - LTC4150

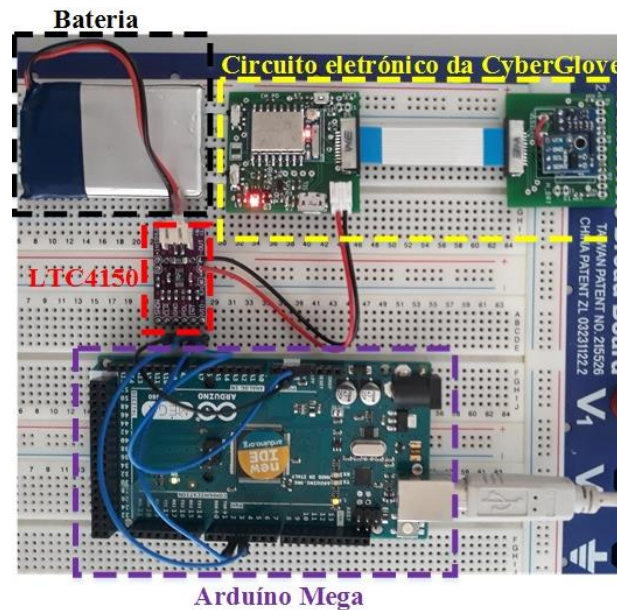


Figura 60 - Circuito de medição do consumo da CyberGlove - HT

Este circuito possibilita medir o consumo médio, sendo que o consumo médio obtido da CyberGlove - HT foi de 100 mA (Figura 61). Os resultados obtidos permitem fazer o cálculo teórico do tempo de duração da bateria, observando os valores obtidos conclui-se que em média a cada 6,15 segundos a bateria descarrega 0,1707mAh [36].

$$\frac{\text{Tempo entre interrupções de descarga da bateria}}{\text{Tempo de duração da bateria}} \leftrightarrow \frac{\text{consumo entre interrupções}}{\text{Capacidade total da bateria}}$$

$$\frac{6,15 \text{ segundos}}{\text{Tempo de duração da bateria}} \leftrightarrow \frac{0,1707 \text{ mAh}}{1050 \text{ mAh}}$$

$$\text{Tempo de duração da bateria} = \frac{6,15 * 1050}{0,1707} \cong 38829 \text{ segundos}$$

Os 38829 segundos é equivalente a 10 horas e 30 minutos e 29 segundos, ou seja teoricamente a duração da bateria é aproximadamente de 10 horas e meia. Efetuando sucessivamente vários teste práticos verificou-se que a bateria durava cerca de 9 horas, o que se supõe dever ao fato que estas baterias de lítio virem com um circuito de proteção que não os deixa descarregar totalmente.

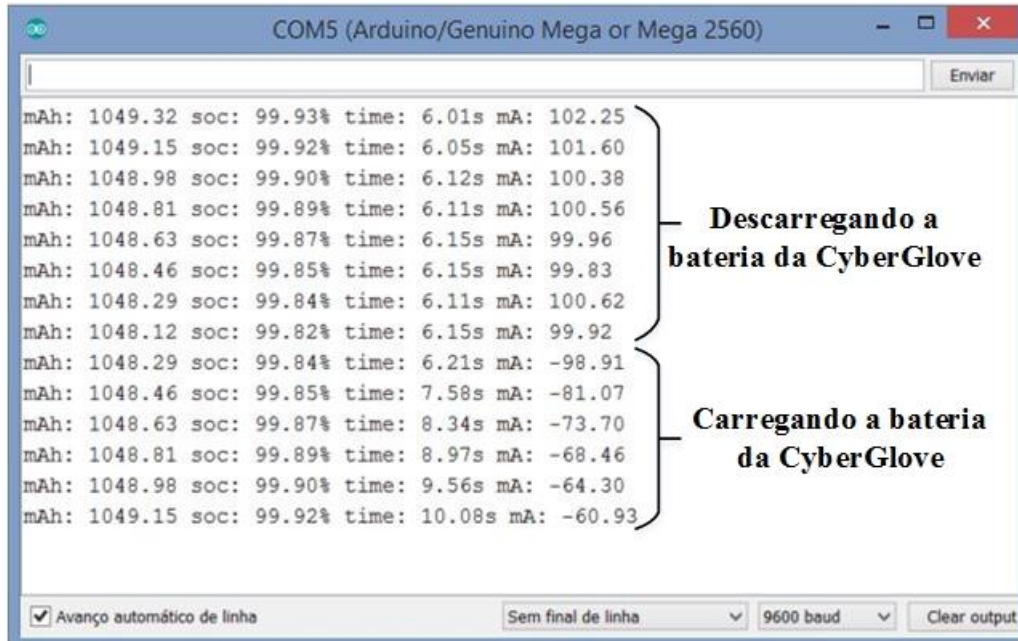


Figura 61 - Valores medidos da bateria através da LTC4150

Como o circuito foi projetado para carregar a bateria a um taxa de 500mAh, teoricamente a bateria demoraria a ser carregada de um estado totalmente descarregada para carregada cerca de duas horas e seis minutos:

$$(1050\text{mAh}/500\text{mA}) * 60 \text{ minutos} = 126 \text{ minutos ou } 2 \text{ horas e } 6 \text{ minutos}$$

Nos sucessivos testes de carregamento efetuados, verificou-se que a bateria demorava cerca 2 horas e 28 minutos a ser totalmente carregada.

5.5 Testes experimentais do sistema global num contexto de realidade imersiva

Esta experiência foi montada no âmbito da publicação na conferência SMC2019 [1]. Para esta experiência, foi criado um cenário de porta virtual para comparar o desempenho da CyberGlove - HT e controlador do HTC Vive. Dois métodos de entrada foram implementados para abrir a porta: o método “*DoorViveController*” que permite a abertura da porta utilizando o controlador da HTC Vive e o “*DoorGlove*” que se refere à porta que

está sendo aberta pela CyberGlove - HT. Em "*DoorViveController*", o utilizador pressiona o botão do controlador para agarrar a maçaneta da porta, enquanto em "*DoorGlove*" o utilizador fecha / abre a mão (dedos) para agarrar ou libertar a maçaneta da porta. Para o "*DoorGlove*", a posição da mão resulta de uma translação da posição do pulso, fornecida pelo Vive Tracker, no entanto, suas orientações podem ser independentes. Para o "*DoorViveController*", a mão e o pulso são um corpo rígido com a posição e orientação fornecidas pelo controlador HTC Vive.

A rotação da maçaneta da porta é calculada utilizando o método *EulerAngles* e é limitada a ângulos predefinidos. Consequentemente, o script que gira a porta é ativado apenas se a rotação da maçaneta da porta atingir um ângulo predefinido. Após a rotação da maçaneta da porta, a posição da mão é usada para calcular o ângulo de rotação da porta. Esse componente é fixado à moldura da porta através de uma junta de dobradiça, que permite uma rotação ao longo de um eixo vertical.

5.5.1 Participantes

A aplicação foi testada de forma voluntária por 22 participantes (7 mulheres e 15 homens) do Instituto Politécnico de Tomar foram convidados a testar o sistema. Os participantes foram principalmente estudantes e pesquisadores de cursos de engenharia. Os participantes tinham entre 20 e 46 anos ($\mu = 26,56$, $\sigma = 6,66$). Quatro dos 22 participantes nunca tiveram contato com a tecnologia de videogame e apenas três indivíduos tiveram experiência anterior com dispositivos de interação como a CyberGlove - HT proposta. Foi utilizado o setup descrito na Figura 24.

5.5.2 Design da Experiência

Uma das aplicações deste trabalho é a promoção imobiliária com ambientes virtuais. Foi projetada uma tarefa típica normalmente executada em casa, uma pessoa atravessa as várias divisões de uma casa e, para isso, precisa abrir uma porta e passar por ela. Um dos focos foi a incorporação e o realismo do movimento da mão durante a rotação do pulso, para os quais a deteção do movimento do pulso e da mão é essencial. Essa tarefa simples compreende uma

série de pequenos passos que as pessoas costumam fazer no mundo real. No entanto, a recreação no ambiente virtual apresenta alguns desafios tecnológicos. Assim, projetou-se uma porta virtual e uma forma de transpor essa porta. Cada pessoa, utilizando um sistema VR HMD que fornece uma visão egocêntrica, foi convidada a executar as seguintes tarefas baseadas na abertura de porta (Figura 62):

- A - Caminhar até a porta
- B - Rodar a maçaneta da porta
- C - Empurrar a porta
- D - Passar pela porta

Essas tarefas foram repetidas por cada utilizador duas vezes:

- 1) Segurando o controlador manual HTC Vive que possui uma interação com o botão de clique e fornece posição e orientação. Para agarrar a maçaneta da porta, o utilizador precisa pressionar um botão.
- 2) Utilizando a CyberGlove - HT desenvolvida, que liberta a mão e permite funcionalidades de agarrar. Para agarrar / soltar a maçaneta da porta, o utilizador precisa fechar / abrir a mão (dedos).

Além disso, foram realizadas avaliações qualitativas e quantitativas, utilizando os dois dispositivos de entrada manuais. A Figura 63 ilustra um participante usando a CyberGlove - HT enquanto executa a tarefa de interação imersiva.

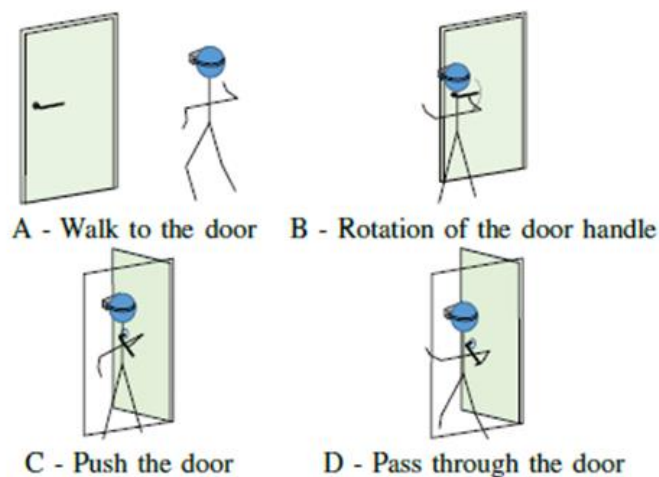


Figura 62 - Passos para abrir a porta no ambiente imersivo.

5.5.3 Procedimento experimental

Os participantes foram individualmente convidados para ir ao laboratório e informados sobre o procedimento para abrir a porta virtual. Uma aplicação registou as medidas de desempenho durante a execução da tarefa. Cada participante executou a tarefa apenas uma vez em cada condição. Os utilizadores não tiveram treino de forma a avaliar melhor a intuitividade da solução. As experiências envolvendo o controlador HTC Vive e o CyberGlove - HT foram realizadas aleatoriamente e, no final, os utilizadores preencheram questionários subjetivos.

5.5.4 Avaliação das medidas

Foram aguardadas medidas qualitativas e quantitativas dos dois dispositivos de entrada:

1) Medidas de eficiência

- Tempo - mede o tempo gasto por uma pessoa para abrir uma porta e passar por ela:
 - Tempo total: tempo total para realizar a tarefa;
 - Tempo da tarefa: mede o tempo gasto por uma pessoa em cada tarefa de abertura de porta (A, B, C e D);
- Comprimento - comprimento do caminho descrito pela mão em cada tarefa (um caminho mais curto significa menos esforço e melhor naturalidade);

2) **Imersão e presença:** para avaliar a experiência qualitativamente, os sujeitos foram convidados a preencher um questionário em uma escala de 1 a 7, onde 1 significava muito fraco e 7 muito forte, permitindo determinar questões como naturalidade (questão Q1), usabilidade (pergunta Q2), sensação de imersão (pergunta Q3) e sentido de incorporação (pergunta Q4). Essas questões foram adaptadas da IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaire e do Usoh e Slater Presence.

- Q1 - A interação com o ambiente virtual pareceu natural?
- Q2 - A manipulação e movimento dos objetos virtuais foi fácil?
- Q3 - Sentiu que estava dentro de um outro mundo, isto é um mundo virtual?
- Q4 - Sentiu que manipulava o ambiente com a sua própria mão?



Figura 63 - Utilizador executando a tarefa de abrir a porta na feira da Futurália

5.5.5 Resultados

1) **Resultados quantitativos:** A Figura 64 mostra a média dos desempenhos no tempo de cada tarefa de abertura da porta virtual, usando o controlador HTC Vive ou o CyberGlove - HT. A significância estatística foi avaliada utilizando o teste de medidas repetidas ANOVA (análise de variância) (asterisco indica estatisticamente significativo). Os resultados mostram que na tarefa C os utilizadores empurraram a porta mais rapidamente utilizando a CyberGlove - HT ($p < 0,05$):

- Tarefa A: $F(1,22) = 0,69$, $p = 0,4156$
- Tarefa B: $F(1,22) = 4.34E-05$, $p=0.9948$
- Tarefa C: $F(1,22) = 6.51$, $p=0.0181^*$
- Tarefa D: $F(1,22) = 1.29$, $p=0.2680$
- Tempo total da tarefa: $F(1,22) = 1.59$, $p=0.2204$

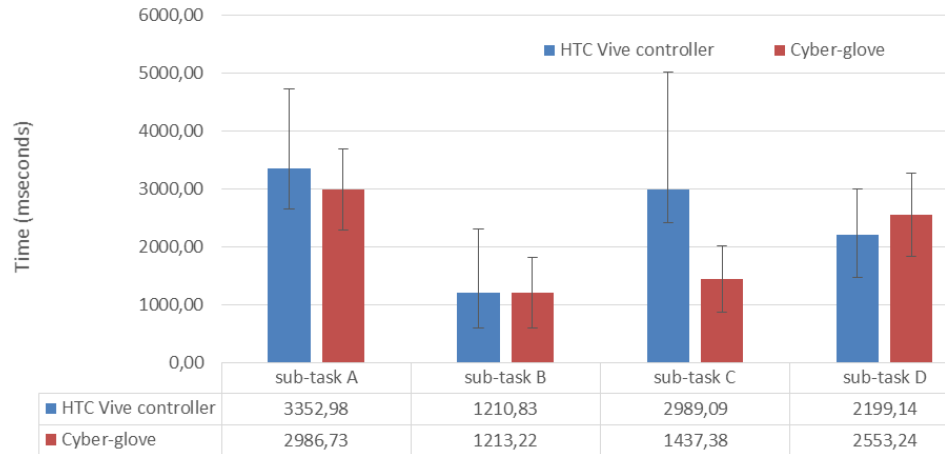


Figura 64 - Desempenho médio em tempo de tarefa dos participantes para cada sub-tarefa da tarefa global de abertura da porta virtual (controlador HTC vive vs Cyber-luva).

A Figura 65 apresenta o comprimento médio do caminho descrito pela mão em cada tarefa da tarefa de abertura de porta virtual, utilizando o controlador HTC Vive ou CyberGlove - HT. A significância estatística foi avaliada pelo teste ANOVA de medidas repetidas:

- Tarefa A: $F(1,22) = 0.014$, $p=0.9054$
- Tarefa B: $F(1,22) = 0.751$, $p=0.3952$
- Tarefa C: $F(1,22) = 9.012$, $p=0.0065^*$
- Tarefa D: $F(1,22) = 1.781$, $p=0.1956$
- Comprimento total da tarefa: $F(1,22)=3.575$, $p=0.0718$

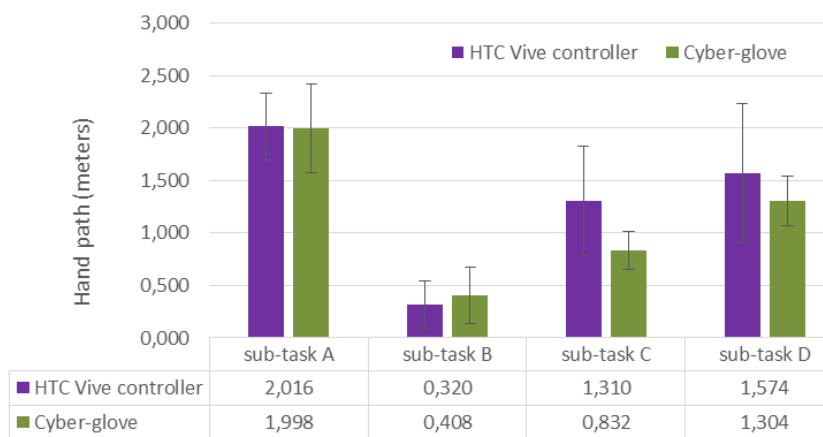


Figura 65 - Comprimento médio do caminho descrito pela mão dos participantes, para cada sub-tarefa da tarefa global de abertura de porta virtual (controlador HTC Vive vs CyberGlove - HT).

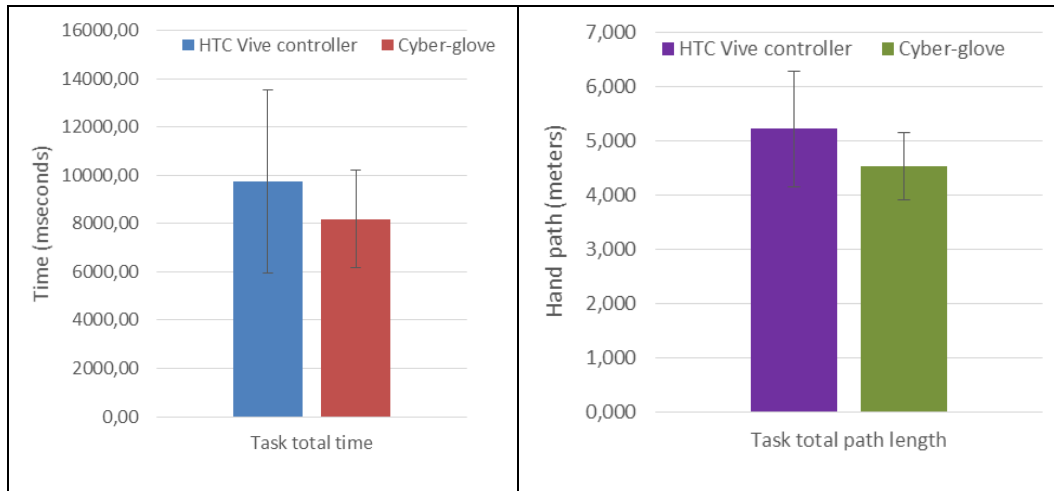


Figura 66 - a) Tempo médio total da tarefa e b) comprimento médio total do caminho descrito pela mão dos participantes durante a execução da tarefa global de abertura de porta virtual, Controlador HTC Vive vs CyberGlove - HT.

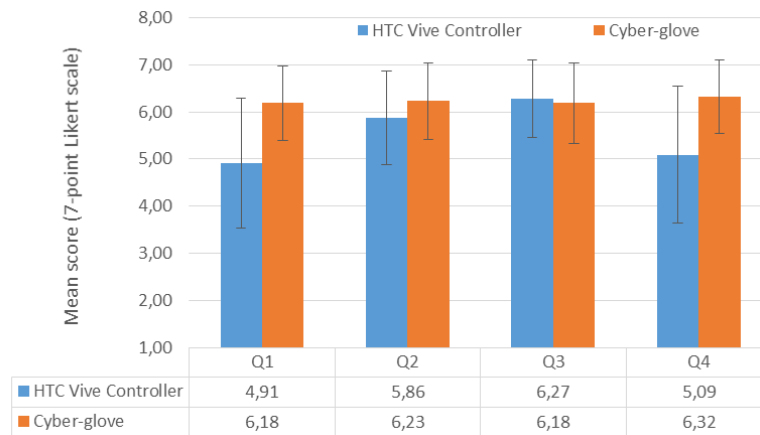


Figura 67 - Resultados de questionários subjetivos aos participantes para avaliar a tarefa de abertura de porta virtual.

Os resultados das medidas revelaram que 83% dos participantes realizaram empurrões de porta mais rápidos e descreveram caminhos mais curtos com as mãos usando a CyberGlove - HT ($p < 0,05$). Na Figura 66, apresenta os resultados médios totais do tempo de tarefa e o comprimento médio total do caminho descrito pela mão dos participantes. O tempo e a duração da tarefa global são menores para a CyberGlove - HT. O teste de significância estatística para o comprimento total do caminho apresenta um $p = 0,0718$.

2) **Resultados subjetivos:** A Figura 67 ilustra os resultados do questionário. O teste unidirecional ANOVA dos participantes para cada pergunta mostra sua significância estatística (marcas de asterisco):

- Q1: $F(1,42)=14.10$, $p=0.00052^*$
- Q2: $F(1,42)=1.77$, $p=0.19018$
- Q3: $F(1,42)=0.13$, $p=0.72144$
- Q4: $F(1,42)=12.29$, $p=0.00109^*$

Todos os participantes classificaram as interações baseadas em CyberGlove - HT como iguais ou mais naturais e 90% dos participantes experimentaram um aumento igual ou significativo no sentido de incorporação.

5.5.6 Discussão

Os resultados objetivos relacionados com o desempenho do tempo de tarefa na tarefa A (“Caminhar até a porta”) mostram que não há diferença temporal significativa ao chegar à porta, nem diferenças no comprimento do caminho descrito pela mão do participante. Isto é, o dispositivo manual não influencia esta tarefa. Em relação ao desempenho do tempo na tarefa B (“Rotação da maçaneta da porta”), os participantes levaram o mesmo tempo para realizar essa tarefa com os dois dispositivos. Os participantes com o controlador HTC descreveram um caminho um pouco mais curto que o CyberGlove - HT, enquanto giravam a maçaneta da porta. De acordo com as expectativas e em relação à tarefa C (“Empurre a porta”), os participantes empurraram a porta para um ângulo de 60° mais rápido com a CyberGlove - HT do que com o controlador HTC. O comprimento da trajetória descrita pela mão enquanto usava a CyberGlove - HT também foi menor.

Os participantes relataram que libertar o manipulador da porta era mais fácil com a CyberGlove - HT porque eles tinham apenas que abrir a mão / dedos e não estavam preocupados com o instante em libertar o botão do controlador HTC. Assim, os participantes executaram melhor a tarefa C com a CyberGlove - HT, sendo o tempo da tarefa e o comprimento do comprimento da mão estatisticamente significativos. Em relação à tarefa D (“Passagem pela porta”), os usuários transpuseram mais rapidamente a moldura da porta que segurava o

controlador HTC Vive do que quando usavam a CyberGlove - HT, no entanto, descreveram um caminho mais longo que segurava o controlador HTC Vive. Para esta tarefa, o início corresponde ao momento em que o usuário remove a mão do manipulador da porta e se move a uma certa distância da porta.

A avaliação qualitativa, baseada em questionários para os participantes, mostra que as CyberGloves contribuem para uma maior naturalidade. Fatores como usabilidade e sensação de imersão parecem semelhantes para ambos os dispositivos, e o senso de incorporação é significativamente aprimorado com a CyberGlove - HT - HT. Vários participantes relataram oralmente que, com a CyberGlove - HT, eles tinham mais liberdade de movimento, enquanto com o controlador HTC Vive sentiam restrições de movimento das mãos e estavam com medo de deixar o controlador cair durante a rodar da maçaneta da porta. No geral, os resultados do protótipo de CyberGlove - HT são muito promissores. No entanto, algumas limitações foram identificadas durante as experiências, a saber, o tamanho da luva não é adequado para todos os participantes devido aos diferentes tamanhos de mãos, e o movimento dos dedos virtuais exibe uma pequena latência em relação ao movimento real dos dedos, devido à modelo de animação.

6 Conclusão

Esta dissertação descreve um sistema de CyberGlove - HT que rastreia os movimentos do pulso, orientação das mãos e movimentos dos dedos, com o objetivo de melhorar a sensação imersiva e a incorporação em ambientes de realidade virtual e mista. O sistema proposto dissocia a posição do pulso e da mão, contribuindo para o sentido da incorporação na manipulação da realidade virtual 3D.

O estudo comparativo entre a CyberGlove - HT e o controlador HTC Vive mostrou que o desempenho no tempo de tarefa de empurrar uma porta virtual é mais rápido ao usar a CyberGlove - HT e, além disso, a mão dos participantes descreve caminhos mais curtos. Os questionários subjetivos mostram que as CyberGloves contribuem para uma maior naturalidade, apresentam graus semelhantes de usabilidade e sensação de imersão, mas melhoram significativamente o sentido da incorporação.

O sistema háptico oferece uma dimensão extra para mundo da realidade virtual, permite que os utilizadores sintam o ambiente virtual através do tato, além da percepção visual. Os utilizadores tem uma sensação mais verdadeira de imersão através do feedback na forma de vibrações, esse feedback fornece sensações físicas na mão possibilitando assim uma simulação realista dos movimentos e comportamentos, semelhantes aos realizados no mundo real.

Como nota final, é importante referir que foi desenvolvido um artigo científico e que o projeto esteve em exposição e divulgação na feira da Futurália 2019, com o objetivo de publicitar o trabalho realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Almeida, É. Lopes, B. Yalçinkaya, R. Martins, A. Lopes, P. Menezes e G. Pires, “Towards natural interaction in immersive reality with a cyber-glove,” *IEEE SMC*, pp. 1-6, 2019.
- [2] “HTC,” [Online]. Available: https://www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/Vive_PRE_User_Guide.pdf. [Acedido em 3 Agosto 2019].
- [3] C. Carvalheiro, “repositorio aberto da universidade do Porto,” 22 Fevereiro 2016. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/110257/2/120403.pdf>. [Acedido em 4 junho 2019].
- [4] H. Gaspar, “Repositorio aberto da Universidade do Porto,” Setembro 2010. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/62136/1/000149203.pdf>. [Acedido em 3 Junho 2019].
- [5] A. Caiusca, “Guia Estudo,” 3 Julho 2019. [Online]. Available: <https://www.guiaestudo.com.br/ossos-da-mao>. [Acedido em 29 Agosto 2019].
- [6] “repositorio aberto da Universidade do Porto,” 30 10 2015. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/80857>. [Acedido em 28 8 2019].
- [7] C. R. Uchôa de Lima, “Universidade Federal do Rio Grande do Sul,” Maio 1999. [Online]. Available: <https://seer.ufrgs.br/InfEducTeoriaPratica/article/viewFile/6266/3734>. [Acedido em 29 Agosto 2019].
- [8] “wikipedia,” 2 Maio 2019. [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Luva_virtual. [Acedido em 30 Agosto 2019].
- [9] “Computableminds,” 11 Junho 2010. [Online]. Available: <http://www.computableminds.com/post/Minority-Report/Gestural-Interface/hand-tracking/glove/hand>. [Acedido em 30 Agosto 2019].
- [10] “CyberGlove Systems,” 2017. [Online]. Available: <http://www.cyberglovesystems.com/cyberglove-iii>. [Acedido em 15 Julho 2019].

- [11] M. A. M. Abreu, “Repositorio Aberto da universidade do Porto,” 30 Outubro 2015. [Online]. Available: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/80857>. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [12] “StretchSense,” [Online]. Available: <https://stretchsense.com/product/multi-knuckle-splay-glove-pair/>. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [13] “est-kl,” [Online]. Available: <https://est-kl.com/manufacture/synertial/igs-cobra-glove.html>. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [14] “MANUS.VR,” [Online]. Available: <https://manus-vr.com/prime-one-gloves/>. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [15] “AvatarVR,” [Online]. Available: <https://avatarvr.es/>. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [16] “xronetop,” 2018. [Online]. Available: http://www.xronetop.com/site/vr-gloves_en. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [17] P. Menezes, “Internation Journal of Interactive Mobile technologies,” 2017. [Online]. Available: <http://online-journals.org/index.php/i-jim/article/download/7074/4533>. [Acedido em 12 Fevereiro 2018].
- [18] “5dt,” [Online]. Available: <http://www.5dt.com/downloads/dataglove/ultra/5DTDataGloveUltraDatashet.pdf>. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [19] “VRSCOUT,” 3 Julho 2018. [Online]. Available: <https://vrscout.com/news/plexus-unveils-vr-ar-gloves/#>. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [20] “haptx,” [Online]. Available: <https://haptx.com/>. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [21] “CyberGlove Systems,” 2017. [Online]. Available: <http://www.cyberglovesystems.com/cybertouch>. [Acedido em 15 Julho 2019].
- [22] “Wikipedia,” 22 Maio 2019. [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sistemas_microeletromec%C3%A2nicos. [Acedido em 2 Setembro 2019].
- [23] “Bosch,” Junho 2016. [Online]. Available: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BNO055-DS000.pdf. [Acedido em 12 Novembro 2018].

- [24] “Adafruit,” 22 Agosto 2018. [Online]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-9-dof-imu-breakout.pdf?timestamp=1571509087>. [Acedido em 14 Agosto 2019].
- [25] “Mouser,” 5 dezembro 2016. [Online]. Available: <https://pt.mouser.com/datasheet/2/693/MTi-1-series-datasheet-1660285.pdf>. [Acedido em 14 Agosto 2019].
- [26] “Mouser,” [Online]. Available: https://pt.mouser.com/datasheet/2/940/6020-3885-01_B_OpenIMU300-1507420.pdf. [Acedido em 14 Agosto 2019].
- [27] 6 Junho 2016. [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/6ae9/78a095117784983c6766b9214aa80b1e83e4.pdf>. [Acedido em 12 Março 2019].
- [28] “Sparkfun,” [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/10264>. [Acedido em 12 Março 2019].
- [29] “StretchSense,” [Online]. Available: <https://stretchsense.com/sensors/>. [Acedido em 15 Março 2019].
- [30] “Tekscan,” [Online]. Available: <https://www.tekscan.com/products-solutions/embedded-force-sensors>. [Acedido em 9 Maio 2019].
- [31] “InterlinkElectronics,” [Online]. Available: <https://www.interlinkelectronics.com/force-sensing-resistor>. [Acedido em 12 Maio 2019].
- [32] “Wikipedia,” 21 Maio 2019. [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sensor_de_dist%C3%A2ncia. [Acedido em 4 Junho 2019].
- [33] “BCN3D,” [Online]. Available: <https://www.bcn3d.com/bcn3d-sigma-r19/>. [Acedido em 16 Abril 2019].
- [34] “Mouser,” 19 Julho 2012. [Online]. Available: https://pt.mouser.com/datasheet/2/302/nxp_74hc_hct4051-1188776.pdf. [Acedido em 12 Março 2019].

- [35] “Mouser,” 14 Março 2014. [Online]. Available: <https://pt.mouser.com/datasheet/2/268/20001984g-846362.pdf>. [Acedido em 29 Abril 2019].
- [36] “Sparkfun,” [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/ltc4150-coulomb-counter-hookup-guide/all>. [Acedido em 11 Setembro 2019].
- [37] M. Borges, A. Symington, B. Coltin, T. Smith e R. Ventura, “Towards a Robotic Society,” *Conference: IEEE International Conference on Intelligent Robots (IROS)*, n° HTC Vive: Analysis and Accuracy Improvement, p. 6, 2018.
- [38] “Invensense,” 18 Setembro 2013. [Online]. Available: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-9150-Datasheet.pdf>. [Acedido em 14 Agosto 2019].
- [39] “Sensor Products,” [Online]. Available: <https://www.sensorprod.com/flex-sensor.php>. [Acedido em 12 Março 2019].
- [40] S. M. C. Patrão, “Repositório Comum,” Dezembro 2015. [Online]. Available: <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/15450>. [Acedido em 7 Janeiro 2018].

ANEXOS

A. Boards dos circuitos no Eagle

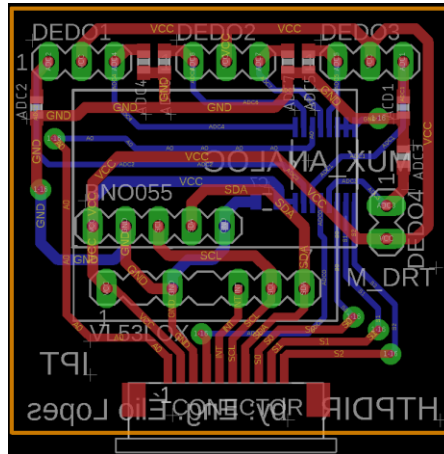


Figura 68 - Board da PCB do Pulso

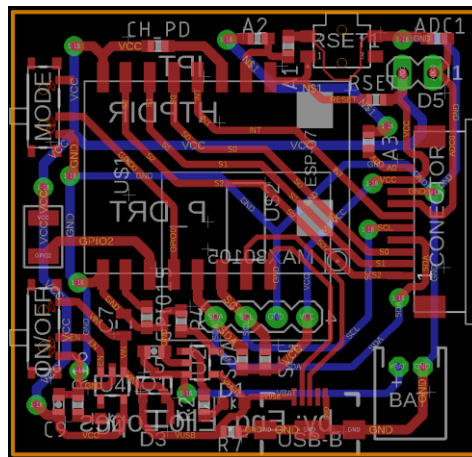


Figura 69 - Board da PCB do Pulso

B. Modulação 3D da CyberGlove - HT

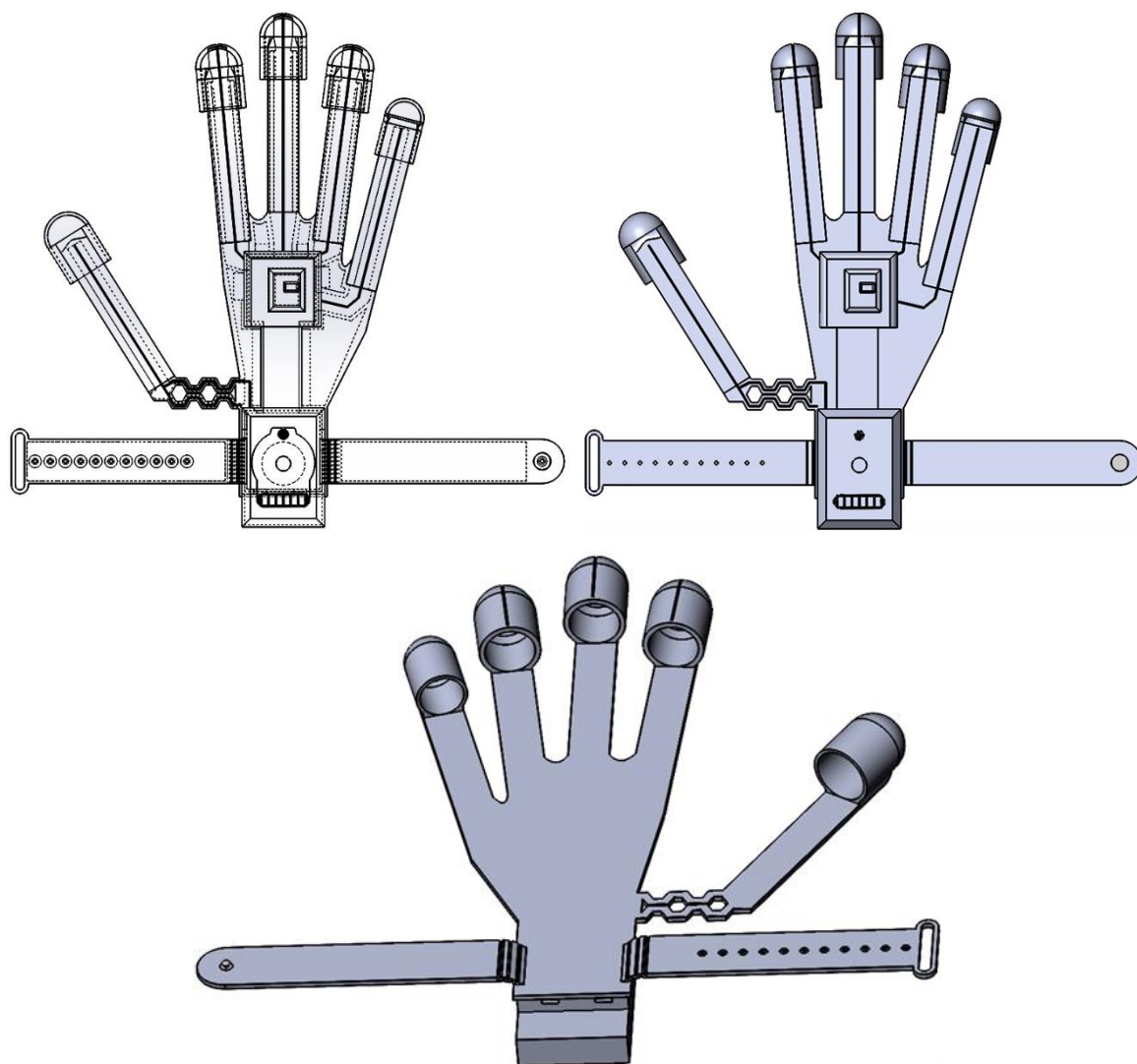


Figura 70 - Modelação 3D da CyberGlove - HT

C. Sistema de rastreamento da HTC VIVE

O VIVE Tracker é um dispositivo de rastreamento posicional acessível e compacto desenvolvido pela HTC VIVE (Figura 71), que mede o movimento com precisão milimétrica ao longo de seis graus de liberdade; permite movimento sem restrições dentro de um espaço de $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$, e pode rastrear até quantos dispositivos se desejar. O sistema comercial consiste em um Headset, dois controladores manuais e dois dispositivos emissores de luz (“lighthouses” ou “estações base”). Cada lighthouse contém uma matriz de LED e dois espelhos montados em rotores de alta precisão. O sistema de rastreamento lighthouse consiste em dois componentes principais, uma lighthouse e um dispositivo rastreado (ou dispositivos rastreados).

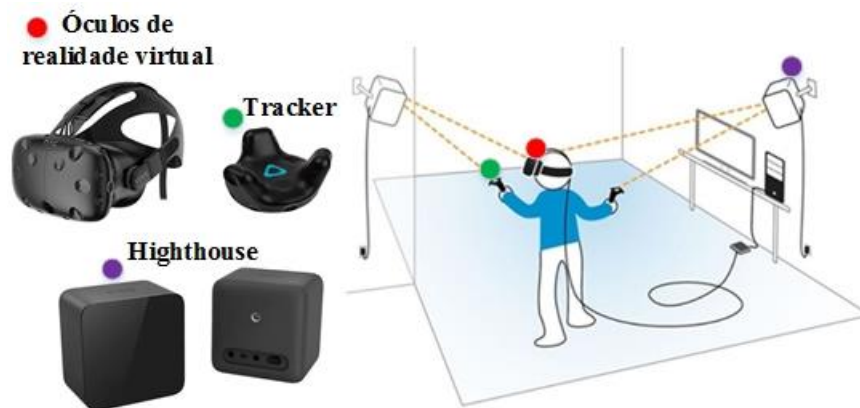


Figura 71 - Sistema de rastreamento da HTC VIVE

I. Lighthouse

A lighthouse é um dispositivo que produz um campo de luz de indexação espaço-temporal que os sensores no dispositivo rastreado podem medir para determinar a posição e orientação com baixa latência e alta precisão. As lighthouses consistem em duas pistolas laser de linha rotativa e um painel de LED, que emitem luz infravermelha. As duas pistolas rotativas estão girando a 60 rotações por segundo em planos perpendiculares entre si, e são desfasadas por fases para varrer o campo de visão do dispositivo (180 graus). O painel de LEDs pisca a 120Hz e está desfasado por fases com os rotores para produzir curtos flashes

entre varreduras de pistolas rotativas. Um diagrama da construção da lighthouse é dado na Figura 72.

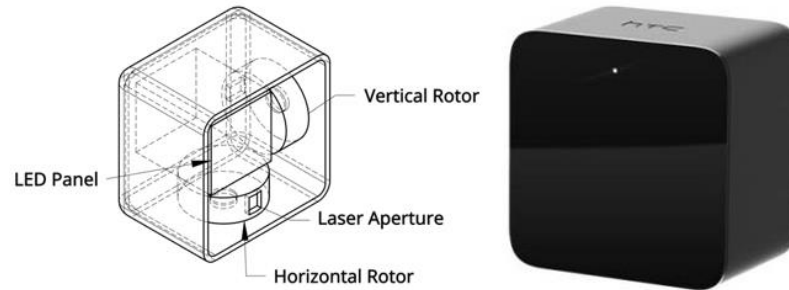


Figura 72 - Lighthouse

O rotor vertical está voltado para a parte de trás do dispositivo quando o rotor horizontal está voltado para frente. Essa condição de fase é imposta pelo loop de controle que executa os dois motores do rotor; se o lighthouse for girado enquanto estiver em operação (transmitindo assim um momento angular que perturba o desfasamento de fase), as pistolas laser e o painel de LEDs deixarão de emitir até que o sistema tenha recuperado essa condição.

II. O dispositivo rastreado

O dispositivo rastreado é composto por um conjunto de sensores de luz, dispostos na superfície do objeto físico. No caso do sistema HTC Vive, os dispositivos rastreados são o HMD (Head-Mounted Display), os controladores e o tracker. As pequenas reentrâncias cobrindo as superfícies desses dispositivos são aberturas atrás das quais os sensores estão localizados (Figura 73).

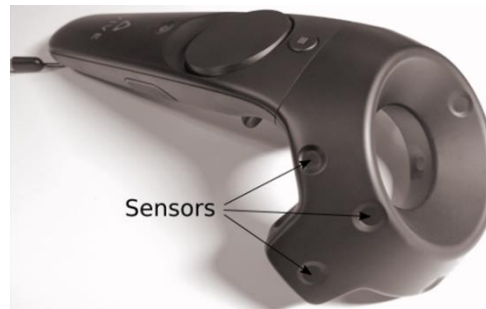


Figura 73 – Controlador da HTC Vive

A disposição dos sensores no dispositivo é conhecida á priori e, como tal, o problema de determinar a posição e orientação do dispositivo é encontrar uma posição e orientação para a qual o erro linear (distância euclidiana) entre as posições estimadas do dispositivo. Os sensores e os pontos mais próximos em seus raios correspondentes são tão pequenos quanto possível. No sistema HTC Vive, cada dispositivo também tem um IMU que é usada para determinar a alta frequência de alterações de posicionamento que são muito rápidas ou mínimas para capturar de forma confiável com o método de rastreamento baseado em luz.

III. Processamento do sinal da Lighthouse

Para cada sequência de sinal luminoso (Tabela 16), cada lighthouse irá piscar primeiro, em seguida, faz um varrimento com o feixe de luz na horizontal ou na vertical. Cada sensor do tracker (fotodiodo) é atingido pelo flash e pelo varrimento, mas a luz atinge cada fotodiodo em momentos diferentes.

Tabela 16 - Tempos de Ativação

Início de pulso (μ s)	Comprimento de pulso (μ s)	Lighthouse de Origem	Significado
0	65 - 135	A	Pulso de sincronização
400	65 - 135	B	Pulso de sincronização
1222-6777	~10	A or B	Pulso de varredura do plano de laser
8333	1556		Fim do ciclo

Cada lighthouse varre a 120Hz. O “plano incidente” é o plano definido pelo ângulo entre um fotodiodo e um lighthouses (Figura 74). O produto cruzado das normais dos planos

de incidentes horizontal e vertical define um vetor (“linha de incidente”) entre o dispositivo rastreado e a lighthouse. A posição absoluta e orientação de cada lighthouse é dada pelo sistema comercial, o que permite projetar as linhas de incidentes de cada lighthouses no sistema de coordenadas global. O par de pontos mais próximo entre essas duas linhas incidentes define a localização absoluta de um dispositivo de rastreamento, que pode ser determinado em 30 Hz.

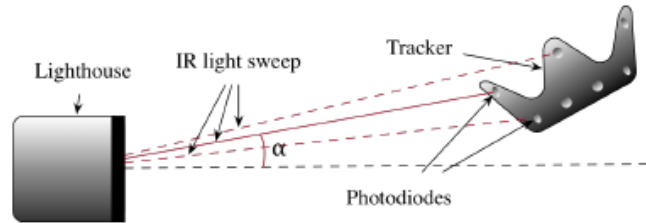


Figura 74 - Princípio de funcionamento do HTC Vive, com α sendo o ângulo entre um plano de varredura e o vetor normal da lighthouse (retirado de [37])

Os sensores infravermelhos (fotodiodo) do tracker colocado em algum lugar no campo de visão da lighthouse produzirá um sinal com a forma mostrada na Figura 75.

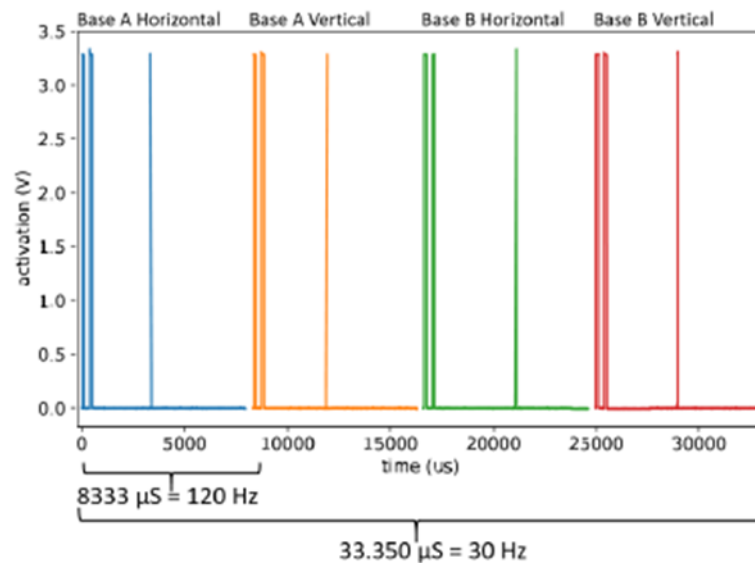


Figura 75 - Sequências de sinal luminoso (4 são mostradas): pulsos amplos são flashes da estação base e pulsos curtos são varreduras de plano a laser.

As lighthouse são sincronizadas e seguem um protocolo específico. A cada segundo, existem 120 fases. Cada fase tem a duração de 8333 μ s (microssegundos) e contém

exatamente três pulsos de luz. Primeiro, cada lighthouse envia um pulso longo e depois uma das lighthouses varre a sala com laser (pulso curto). Existem tipos de pulsos de luz são:

- SKIP: a lighthouse que envia este pulso não varrerá a sala com laser (pulso mais longo)
- NSKIP: a lighthouse varrerá a sala com laser (pulso longo)
- SWEEP: laser varre a sala no eixo x ou y (pulso curto)

A duração medida entre o início do último NSKIP e o início do último SWEEP define o ângulo do farol para o sensor.

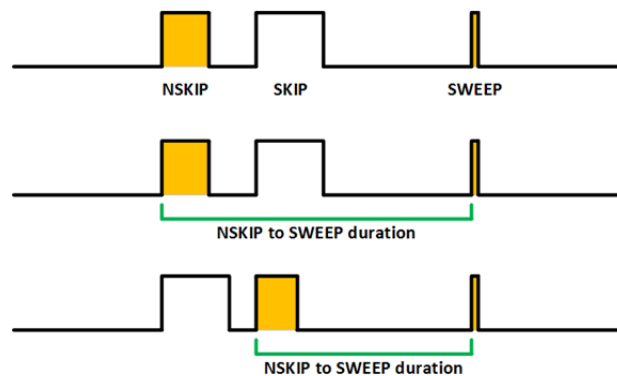


Figura 76 - Exemplos de fases e tipos de pulso

Tabela 17 - Codificação do pulso de sincronização do lighthouse

Largura de pulso de sincronização [uS]	Skip	Data	axis
62.5	0	0	0
72.9	0	0	1
83.3	0	1	0
93.8	0	1	1
104	1	0	0
115	1	0	1
125	1	1	0
135	1	1	1

O bit de skip codifica se o motor atual pula o ciclo atual ou se continua no ciclo ativo. O bit de axis codifica qual motor está atualmente ativo (vertical: 0, horizontal: 1).

IV. Cálculo de posição e orientação

Para efetuar o cálculo da posição e orientação do objeto rastreado é preciso saber a duração dos pulsos e a distância temporal entre os pulsos. O tempo entre P1 e P2, e o tempo entre P4 e P5 são muito mais curtos do que os ilustrados na Figura 77. Os pulsos de sincronização P1, P2, P4 e P5 são recebidos simultaneamente por todos os fotodiodos do objeto rastreado. Para medir o tempo dos pulsos simultâneos, a unidade de processamento deve ser implementada usando uma matriz de portas programável (FPGA) ou um microcontrolador com funcionalidade de captura de cronometragem de *hardware* automática.

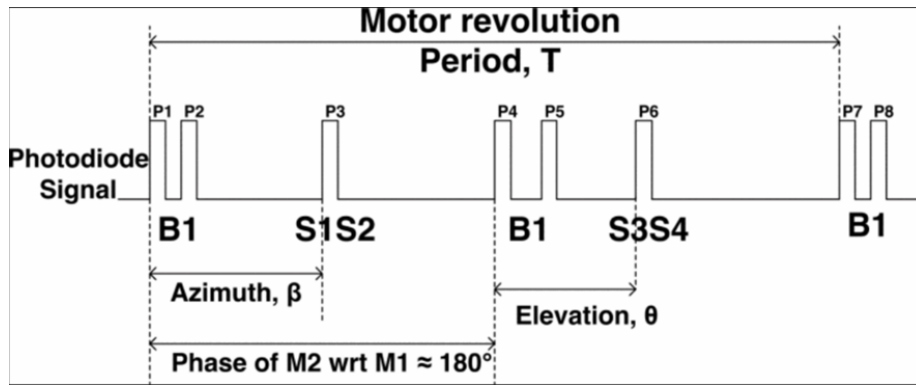


Figura 77 - Exemplo de trem de pulso recebido por um fotodiodo num objeto rastreado.

A unidade de processamento calcula os ângulos de azimute e elevação para cada fotodiodo da seguinte modo:

$$Azimuth, \beta = \left(\frac{time(P3) - time(P1)}{T} \right) * 360$$

$$Elevation, \theta = \left(\frac{time(P6) - time(P4)}{T} \right) * 360$$

A Figura 78 ilustra a constelação do sensor fotodiodo ABC. A projeção da constelação de sensores ABC no plano XY é A'B'C'. O R_A , R_B , e R_C , são os vetores de

localização que representam os sensores fotodiodo em A (X_A, Y_A, Z_A), B (X_B, Y_B, Z_B), e C (X_C, Y_C, Z_C) respectivamente.

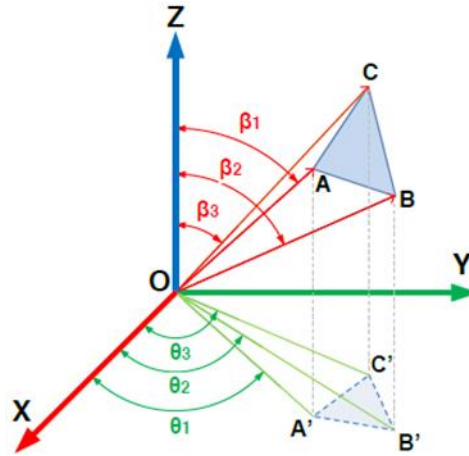


Figura 78 - Constelação de sensores ABC em coordenadas cartesianas

De acordo com o sistema de coordenadas esféricas (alcance, azimute e elevação), os fotodiodos A, B e C estarão localizados (R_A, θ_1, β_1) , (R_B, θ_2, β_2) e (R_C, θ_3, β_3) . Os ângulos de azimute (θ) e a elevação (β) são medidos através dos varrimentos da estação base. Os intervalos dos sensores são calculados resolvendo um sistema de equações não lineares derivadas. Para um sensor na constelação em (X, Y, Z) com o alcance $|R^{\vec{}}|$ azimute θ e elevação β , pode-se derivar o seguinte:

$$X = |R^{\vec{}}| \sin(\beta) \cos(\theta)$$

$$Y = |R^{\vec{}}| \sin(\beta) \sin(\theta)$$

$$Z = |R^{\vec{}}| \cos(\beta)$$

D. Tracker desenvolvido

Realizou-se a engenharia reversa do protocolo de comunicação entre os lighthouse e os dispositivos de rastreamento comerciais (tracker ou controlador), a fim de substituir os dispositivos comerciais por dispositivos personalizados otimizados para atender às nossas necessidades. A Figura 79 apresenta o circuito eletrônico desenvolvido para captura dos sinais da lighthouse. O circuito é composto por dois elementos fundamentais, BPV22NF e o TLV2462IP. O BPV22NF é um fotodiodo que foi utilizado para receber os sinais da lighthouse, o TLV2462IP é um ampop e foi utilizado para fazer a amplificação do sinal recebido da lighthouse e filtrar a luz ambiente.

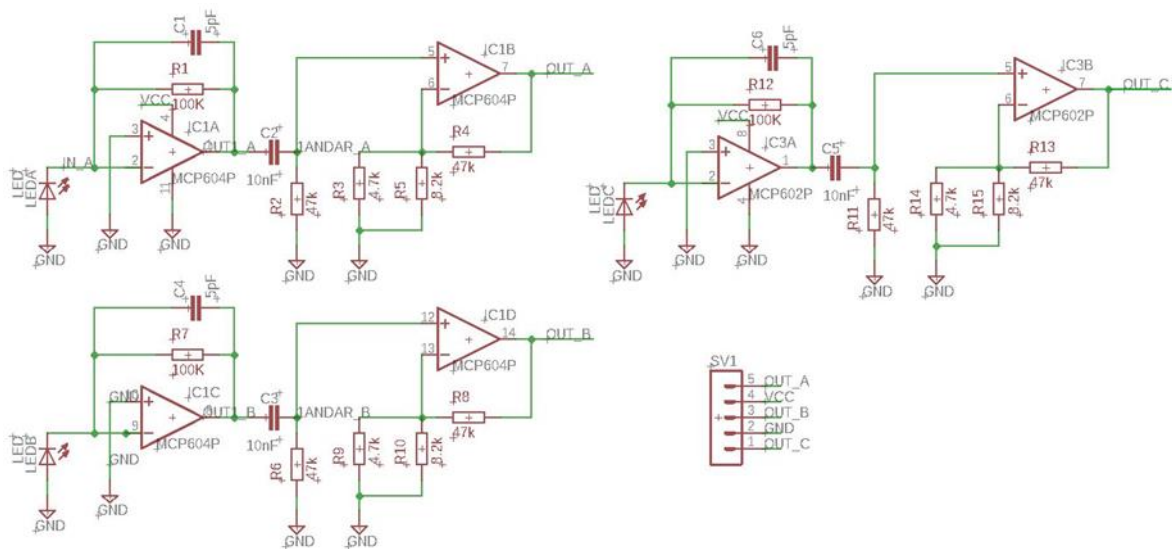


Figura 79 - Esquema do circuito desenvolvido

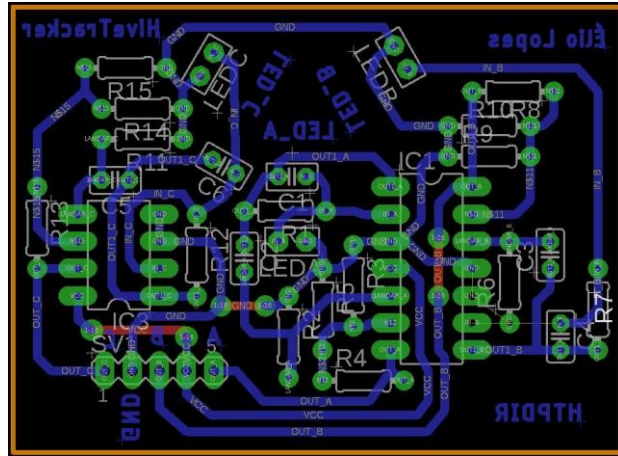


Figura 80 -Board do Tracker desenvolvido

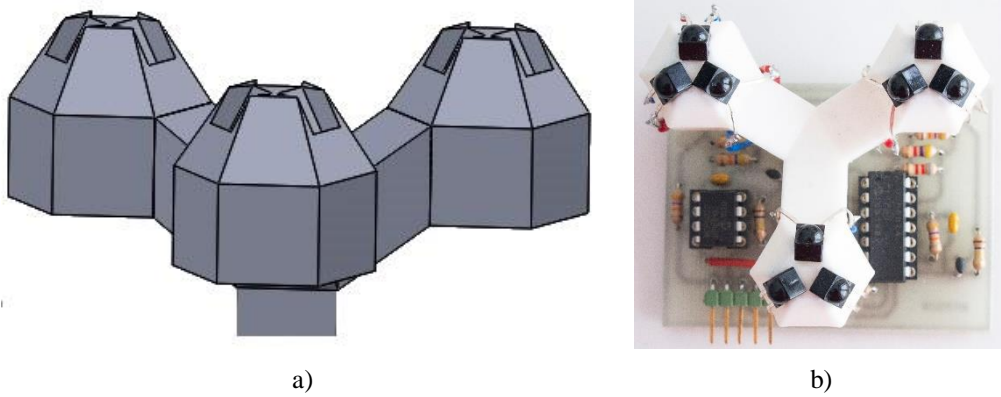


Figura 81 - a) Desenho do tracker no Solidworks; b) Tracker desenvolvido

Os fotodiodos sempre que forem atingidos pela luz infravermelha da lighthouse este fica ativo. Para verificar estes pulsos, colocou-se o tracker desenvolvido no raio de ação das lighthouses. Com o tracker conectado a um osciloscópio, confirmou-se que a cada pulso de sincronização de flash ou varredura, os fotodiodos ficam ativos (Figura 82).

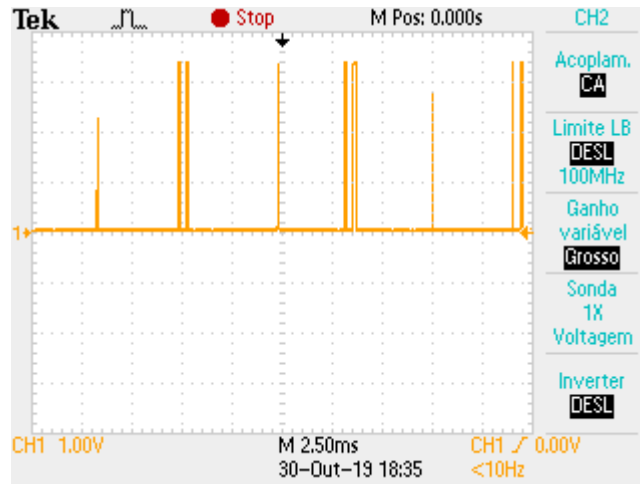


Figura 82 - Sinal da lighthouse visualizado no osciloscópio

O protótipo do tracker ainda encontra-se em desenvolvimento, depois de já termos o sinal da lighthouse o próximo objetivo é ler os tempos dos pulsos com um microcontrolador e transmitir esses tempos via WiFi para a Unity com a finalidade de calcular a posição do tracker e atualiza-la no ambiente virtual.