

BISTURI CIRÚRGICO HÁPTICO COM COMUNICAÇÃO BLE INTEGRADO A AMBIENTE DE REALIDADE VIRTUAL IMERSIVA

 <https://doi.org/10.56238/sevened2025.013-006>

Vinicius Fernando de Souza

Mestrando em Engenharia Elétrica Instituto de Ciência e Tecnologia – ICTS/UNESP e FIT
Instituto de Tecnologia – FIT Sorocaba, SP
E-mail: vinicius.desouza@fit-tecnologia.org.br
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/7683836197126300>

Fabio da Silva Moraes

Doutor em Ciências Farmacêuticas FIT Instituto de Tecnologia – FIT Sorocaba, SP
E-mail: fabio.moraes@fit-tecnologia.org.br
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/9399791247286107>

Rodrigo Ferraz Azevedo

Mestre em Ciências da Computação FIT Instituto de Tecnologia – FIT Sorocaba, SP
E-mail: rodrigo.ferraz@fit-tecnologia.org.br
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/4338335955556745>

Ivando Severino Diniz

Professor Doutor em Engenharia Elétrica Instituto de Ciência e Tecnologia – ICTS/UNESP
Sorocaba, SP
E-mail: ivando.diniz@unesp.br
LATTES: <http://lattes.cnpq.br/6325302830524601>

RESUMO

Este artigo apresenta o relato técnico sobre o desenvolvimento de um bisturi cirúrgico háptico com comunicação Bluetooth Low Energy (BLE), projetado para integração a ambientes de realidade virtual (VR) imersiva utilizando o headset Meta Quest 2. O dispositivo, baseado no microcontrolador Seeed XIAO BLE Sense nRF52840, integra sensores de movimento, motores de vibração e uma interface de controle manual. A comunicação BLE permite a transmissão em tempo real dos dados de movimento e comandos para o ambiente virtual, onde são interpretados e utilizados para simulações cirúrgicas interativas. Os testes realizados demonstraram baixa latência de comunicação (~22 ms), elevada precisão sensorial e estabilidade da transmissão de dados, além de uma autonomia de bateria de até 10 horas. O sistema de feedback háptico implementado permitiu a diferenciação sensorial entre camadas simuladas de pele, músculo e osso. Os resultados apontam o potencial do dispositivo como ferramenta de apoio ao treinamento médico e às tecnologias de ensino imersivo.

Palavras-chave: Feedback Tátil. Simulação Cirúrgica. Dispositivo Médico. BLE. 3DUI.

1 INTRODUÇÃO

A realidade virtual (VR) permite proporcionar aos usuários experiências imersivas além dos limites do mundo real (Mostafa et al., 2014). Essas tecnologias emergentes de realidade-virtualidade têm aplicações em diferentes campos da vida, ou seja, saúde, engenharia, design, robótica, automotivo, industrial, manufatura e design, marketing e publicidade, construção, educação, treinamento agrícola, operação militar, entretenimento e turismo etc (Mirza et al. 2022). Para González (2020) os avanços recentes na tecnologia de VR também têm possibilitado a criação, aplicação, avaliação e entrega de aplicações interativas a um custo menor.

O interesse crescente na utilização de tecnologias imersivas, impulsionado pelos avanços em hardware e software de alta qualidade, tem promovido a evolução deste campo (Fonnet & Prié, 2021).

Segundo Xie (2021), a imersão é uma característica definidora da VR, permitindo que o usuário seja transportado para um mundo totalmente virtual, distanciando-se da realidade física, principalmente através da visão e audição.

Este projeto consiste em um relato técnico de prototipação com foco no hardware desenvolvido (Bisturi) e suas integrações com os óculos Meta Quest 2 e ambiente virtual 3D desenvolvido em Unity. Foi estudado a placa XIAO SEED nRF52840 SENSE, que utiliza o controlador nRF52840 da Nordic, de modo a estabelecer uma sistemática de programação e de implementação de uma comunicação via Bluetooth de modo que possa se conectar aos óculos Meta Quest 2, transmitindo os dados tratados do acelerômetro e giroscópio aos óculos Meta Quest 2, o dispositivo contará com 4 botões digitais e um trimpot para ajustar a sensibilidade.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um bisturi com sensores e atuadores, conectado via BLE aos óculos Meta Quest 2 com um ambiente de realidade virtual imersiva desenvolvida em Unity, permitindo a prática cirúrgica com resposta tátil através de diferentes níveis de vibração do bisturi, dependendo do tipo de tecido que está sendo manipulado no ambiente de realidade virtual.

2 METODOLOGIA

Este artigo apresenta um relato técnico sobre o desenvolvimento de um protótipo de bisturi háptico com comunicação Bluetooth Low Energy (BLE), projetado para integração com ambientes de realidade virtual imersiva por meio dos óculos Meta Quest 2. O objetivo central do trabalho é descrever a criação de um protótipo que viabilize a interação física e tátil entre o usuário e um ambiente simulado de treinamento cirúrgico.

O processo metodológico foi estruturado em três frentes de desenvolvimento integradas:

- i. Hardware eletrônico: O circuito foi implementado utilizando o módulo Seed XIAO BLE Sense (nRF52840), que incorpora conectividade BLE e recursos computacionais embarcados. Foram conectados sensores inerciais - 1 acelerômetro analógico (ADXL335) e 1 giroscópio

digital (LSM6DS3) para coleta de dados de movimento e orientação. 4 botões físicos foram incluídos para entrada digital de comandos. 2 motores de vibração, controlados via transistores, foram adicionados para fornecer resposta tátil durante a simulação. A alimentação do sistema é realizada por uma bateria Li-Po de 3,7 Volts. O layout do circuito foi desenvolvido em software de CAD eletrônico (KiCad) e posteriormente fabricado e montado, incluindo encapsulamento físico por meio de modelagem e impressão 3D do invólucro do bisturi.

- ii. Firmware embarcado: O firmware foi desenvolvido na plataforma Arduino. A lógica principal compreende: leitura dos sensores (com aplicação de filtros e compensações de viés), detecção de eventos nos botões, codificação dos dados sensoriais em pacotes compactos e transmissão via BLE. O sistema também interpreta comandos recebidos do ambiente virtual, controlando os motores de vibração de forma seletiva, conforme intensidade e tempo definidos na mensagem de controle.
- iii. Ambiente virtual interativo: A aplicação foi desenvolvida na engine Unity, utilizando o asset “Bluetooth LE for iOS, tvOS, and Android” para comunicação com o protótipo via BLE. O ambiente virtual simula uma sala cirúrgica, incluindo representação visual de um corpo humano e interação com o bisturi. Scripts específicos realizam o pareamento com o dispositivo físico, processam os dados recebidos e atualizam a posição e rotação do bisturi virtual. A resposta tátil é ativada conforme os eventos de corte simulados em diferentes camadas (pele, músculo, osso), gerando comandos que são enviados ao hardware.

Essa abordagem permitiu a prototipação de um sistema funcional com comunicação bidirecional entre o hardware e o ambiente virtual.

2.1 MATERIAIS

O protótipo foi montado utilizando os seguintes materiais principais:

- Meta Quest 2: headset de realidade virtual utilizado para visualização da simulação
- Módulo Seeed XIAO BLE Sense nRF52840: microcontrolador responsável pela coleta de dados dos sensores e comunicação BLE;
- Acelerômetro ADXL335: sensor analógico de aceleração tridimensional;
- Trimpot de 10k Ω : ajuste manual da intensidade de movimentação do bisturi;
- Bateria Li-Po 3,7V 500mAh: fonte de alimentação do sistema;
- Motores de vibração: atuadores responsáveis pelo feedback tátil;
- Botões de pressão (push buttons): utilizados para interação manual do usuário com o ambiente VR;

- Componentes eletrônicos auxiliares: resistores, transistores, diodos e cabos de conexão. Cada componente foi selecionado de forma a otimizar a relação entre desempenho, consumo energético e integrabilidade com sistemas de realidade virtual.

2.2 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

A implementação do bisturi integrado com o ambiente de realidade virtual requer uma abordagem estruturada que englobe hardware, firmware e software, garantindo a sincronização entre o dispositivo físico e o ambiente virtual. O desenvolvimento do sistema foi baseado em um conjunto de componentes eletrônicos, protocolos de comunicação Bluetooth Low Energy (BLE) e integração com o ambiente Unity para simulação cirúrgica no Meta Quest 2.

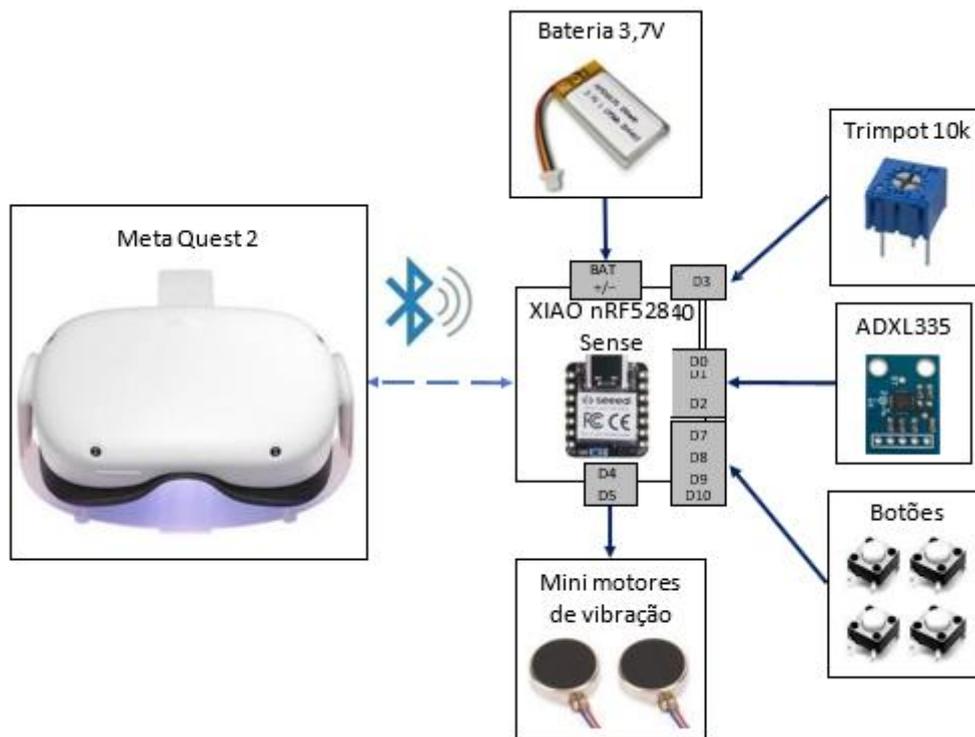
A abordagem de desenvolvimento seguiu as seguintes etapas:

1. Projeto e montagem do hardware – Definição dos componentes, elaboração do circuito eletrônico e fabricação da PCI.
2. Desenvolvimento do firmware – Implementação do código embarcado para captura de dados dos sensores, acionamento dos motores de vibração e comunicação BLE.
3. Configuração do ambiente de realidade virtual – Implementação da sala de cirurgia no Unity, modelagem do bisturi virtual e integração com o Meta Quest 2.
4. Implementação dos scripts BLE no Unity – Desenvolvimento de código para comunicação entre o bisturi e a simulação, garantindo que os movimentos do bisturi físico sejam refletidos corretamente no ambiente virtual.

Além disso, para garantir baixo consumo de energia e comunicação eficiente, o protocolo Bluetooth Low Energy (BLE) foi utilizado para a transmissão de dados entre o bisturi e o Meta Quest 2. Isso possibilita que informações como movimentos do bisturi, acionamento de botões e feedback tátil via motores de vibração sejam enviados em tempo real, criando uma experiência de simulação cirúrgica mais imersiva e realista.

A Figura 1 apresenta o diagrama do circuito que ilustra a integração dos componentes eletrônicos com o dispositivo de realidade virtual Meta Quest 2 por meio de comunicação Bluetooth Low Energy.

Figura 1 - Diagrama de blocos



Fonte: Autor, 2025.

O diagrama da Figura 1 ilustra a estrutura do sistema de simulação médica em realidade virtual imersiva, com o Meta Quest 2 como interface principal. O microcontrolador Seeed XIAO BLE Sense nRF52840 é o responsável por gerenciar a comunicação via Bluetooth Low Energy (BLE), recebendo e enviando dados de sensores e atuadores para o ambiente virtual em tempo real.

O Seeed XIAO BLE Sense nRF52840, localizado no centro do diagrama, conecta-se aos seguintes componentes principais:

- Acelerômetro ADXL335 (portas D0, D1 e D2): Captura a aceleração nos eixos X, Y e Z, permitindo o monitoramento de movimentos e inclinações, essenciais para a interação no ambiente virtual.
- Trimpot de 10kΩ (porta D3): Permite ajustar a sensibilidade dos movimentos ou a velocidade de resposta do sistema, proporcionando uma experiência personalizada para o usuário.
- Motores de vibração (portas D4 e D5): Oferecem feedback háptico ao usuário, simulando sensações físicas durante a interação com objetos virtuais. Isso aumenta a imersão e realismo da simulação, especialmente em cenários cirúrgicos.
- Push buttons (portas D7 a D10): Atuam como interface de controle manual, permitindo ao usuário executar comandos específicos, como seleções ou ajustes no ambiente virtual.

- A bateria Li-Po fornece energia para todo o sistema, conectando-se ao microcontrolador para garantir uma operação autônoma e contínua, com um circuito de carregamento integrado ao módulo Seed XIAO BLE Sense.

O sistema visa proporcionar uma experiência imersiva e responsiva, integrando dados de movimento e controle com o ambiente de realidade virtual através do Meta Quest 2. A comunicação via Bluetooth Low Energy garante a transmissão de dados com baixa latência, essencial para que as interações no ambiente virtual sejam replicadas de forma precisa e em tempo real.

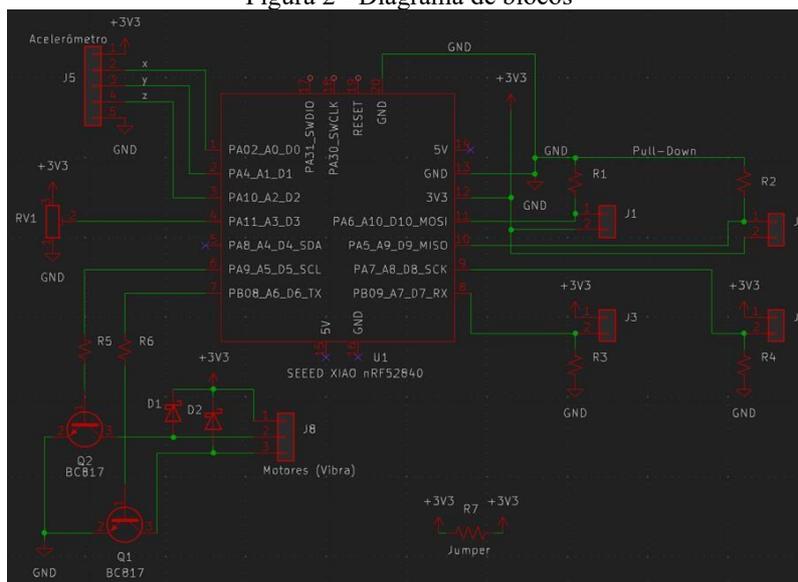
O feedback háptico, proporcionado pelos motores de vibração, é sincronizado com as ações realizadas no ambiente virtual, simulando, por exemplo, o toque de instrumentos cirúrgicos em tecidos, aumentando a fidelidade da simulação.

2.2.1 Montagem do Hardware

Inicialmente, o circuito eletrônico foi projetado em protoboard, interligando os sensores, atuadores e o microcontrolador. As conexões foram validadas para assegurar a estabilidade dos sinais e a proteção dos componentes, utilizando resistores pull-down e diodos de proteção contra tensões reversas geradas pelos motores.

O diagrama esquemático apresentado na Figura 2 ilustra o circuito responsável pela comunicação entre o módulo Seed XIAO BLE Sense nRF52840, sensores, atuadores e outros componentes no sistema.

Figura 2 - Diagrama de blocos



Fonte: Autor, 2025.

Este circuito integra o acelerômetro, que detecta movimentos em três eixos, e os motores de vibração, que fornecem feedback tátil. Os botões e o trimpot fornecem controle manual e ajustes de

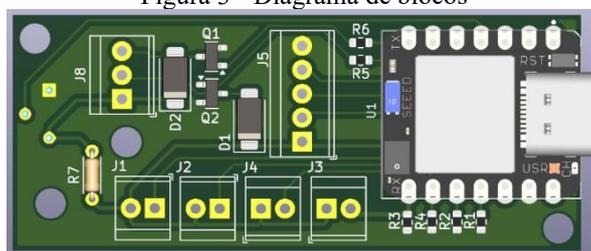
sensibilidade ao sistema. O módulo Seeed XIAO BLE Sense nRF52840 coordena todas essas entradas e saídas e transmite dados para o Meta Quest 2 via Bluetooth Low Energy (BLE), permitindo a interação do usuário com o ambiente de realidade virtual em tempo real.

Posteriormente, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso (PCI) de dimensões aproximadas de 60 mm x 25 mm, projetada para otimizar a distribuição dos componentes e minimizar interferências eletromagnéticas.

A Figura 3, apresenta a disposição dos principais componentes na PCB.

- O conector J8 está alocado para a conexão dos motores de vibração, que fornecem feedback tátil ao usuário.
- Os conectores J1 a J4 são utilizados para a conexão de botões de controle, que permitem ao usuário interagir diretamente com o sistema.
- O acelerômetro é conectado no conector J5, monitorando os movimentos nos eixos X, Y e Z.
- Diodos D1 e D2 são utilizados para proteger o circuito contra picos de tensão gerados pelos motores de vibração, enquanto transistores BC817 (Q1 e Q2) controlam a ativação dos motores.
- O módulo Seeed XIAO BLE Sense nRF52840 (U1) é o componente central da PCB, recebendo os sinais dos sensores e controlando os atuadores.

Figura 3 - Diagrama de blocos



Fonte: Autor, 2025.

2.2.2 Desenvolvimento do Firmware

O firmware embarcado foi desenvolvido na IDE Arduino, utilizando bibliotecas especializadas como "bluefruit.h" e "Adafruit_TinyUSB.h". O código foi estruturado para:

- Capturar dados do acelerômetro e giroscópio;
- Processar comandos dos botões e trimpot;
- Acionar os motores de vibração via PWM;
- Transmitir os dados sensoriais via BLE utilizando o protocolo GATT.

Foram aplicados filtros digitais para reduzir ruídos e melhorar a precisão dos dados enviados ao ambiente virtual. Testes preliminares garantiram a estabilidade da comunicação BLE e a integridade dos pacotes transmitidos.

Foi desenvolvido todo o firmware, de modo a integrar todos os componentes do hardware, o resultado pode ser visualizado a Figura 4 apresenta a estrutura principal do código.

Figura 4 - Estrutura principal do código

```
nRF52840_BLE_GATT_v2.ino  main.h
1  #include "main.h"
2
3  BLEDis bledis;
4  BLEService customService = BLEService(0x1234); // UUID personalizado para seu serviço
5  BLECharacteristic allDataChar = BLECharacteristic(0xFFFF);
6  BLECharacteristic motorControlChar = BLECharacteristic(0x2C03);
7  LSM4DS3 internal_IMU(I2C_MODE, 0x6A);
8
9  > void setup() { ...
36 }
37
38 > void loop() { ...
114 }
115
116 > void initPeripherals() { ...
155 }
156
157 > float updateAxisData(int axisPin, float bias) { ...
162 }
163
164 > uint8_t checkButtons() { ...
173 }
174
175 > void calibrateGyroscope() { ...
187 }
188
189 > void int1ISR() { ...
194 }
195
196 > void onMotorControlWrite(uint16_t conn_hdl, BLECharacteristic* chr, uint8_t* data, uint16_t len) { ...
221 }
```

Fonte: Autor, 2025.

O firmware integra de forma eficiente o controle de hardware (acelerômetros, giroscópios, motores de vibração e botões) com a comunicação BLE, possibilitando a criação de uma interface háptica para simulações de cirurgias em ambientes de realidade virtual. A utilização de um filtro passa-baixa para compensar o impacto das vibrações, juntamente com o envio de dados em tempo real via BLE, faz deste firmware uma solução viável para simulações interativas e imersivas. A modularidade e a escalabilidade do código permitem sua expansão para outros dispositivos e funções, tornando-o adequado para aplicações futuras em interfaces homem-máquina em ambientes médicos simulados.

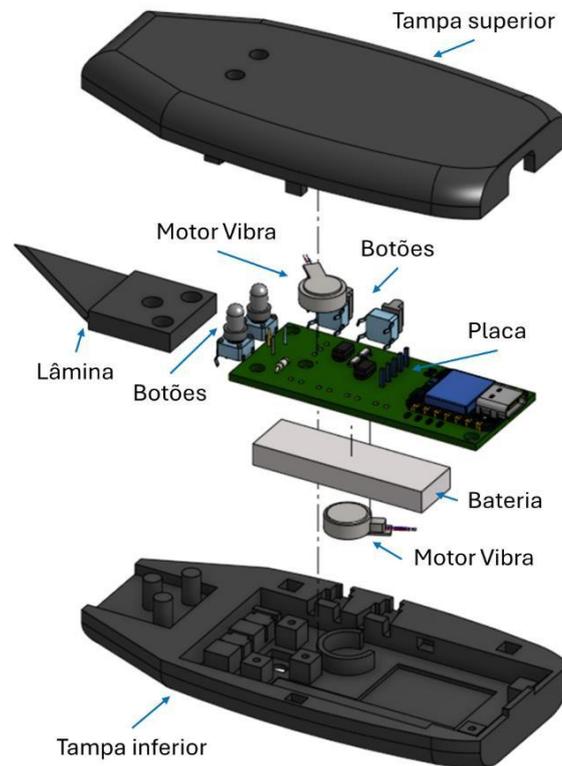
2.2.3 Projeto Mecânico

O invólucro do bisturi foi projetado em software de modelagem 3D (OnShape) e produzido via impressão 3D utilizando material PLA (ácido polilático). O design priorizou ergonomia, leveza e a distribuição equilibrada dos componentes internos. A estrutura interna foi planejada para permitir acesso facilitado à bateria e à placa eletrônica, bem como para assegurar a correta dissipação de calor.

Após a conclusão do design, o bisturi foi impresso em 3D e montado com todos os componentes internos, como a placa com seus componentes, motores de vibração, e os botões.

A Figura 5 ilustra o design final do bisturi, com uma vista explodida que mostra a distribuição dos componentes internos e como eles se encaixam na estrutura externa.

Figura 5 - Vista explodida bisturi e componentes



Fonte: Autor, 2025.

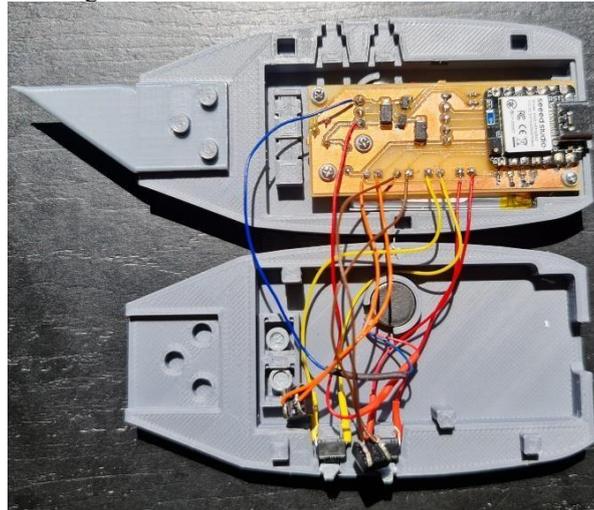
2.2.4 Implementação do sistema

A placa de circuito impresso foi projetada com base no circuito previamente validado em protoboard, utilizando o SEEED XIAO BLE nRF52840 Sense como controlador principal.

A fabricação da placa de circuito impresso foi realizada em uma fresadora CNC (usina de placas), utilizando uma placa de fenolite simples.

A Figura 6 apresenta a placa totalmente montada e conectada ao case do bisturi.

Figura 6 - Bisturi montado em funcionamento



Fonte: Autor, 2025.

O case do bisturi foi projetado para acomodar todos os componentes eletrônicos. O resultado do protótipo, já montado e funcional, pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Bisturi completo montado



Fonte: Autor, 2025.

Com a montagem do hardware e o desenvolvimento do firmware concluídos, procedeu-se à integração com o ambiente de realidade virtual. O bisturi foi configurado para se conectar automaticamente ao Meta Quest 2 via BLE, transmitindo continuamente dados de movimento e acionamento de botões.

Scripts desenvolvidos em C# no Unity permitiram a leitura das características BLE, a interpretação dos dados sensoriais e o controle dos modelos tridimensionais no ambiente virtual, sincronizando movimentos e respostas hápticas.

2.3 CONFIGURAÇÃO DO AMBIENTE VIRTUAL

O ambiente de simulação cirúrgica foi desenvolvido na plataforma Unity, utilizando o pacote XR Interaction Toolkit para integração com o Meta Quest 2. Foram criados scripts personalizados para:

- Escanear e parear dispositivos BLE;
- Capturar dados dos sensores e traduzi-los em movimentos do bisturi virtual;
- Implementar a lógica de corte de malhas tridimensionais e geração de feedback tátil.

O ambiente virtual foi projetado para ser intuitivo e proporcionar uma experiência imersiva fluida, com latência reduzida e resposta sensorial adequada. A sala de cirurgia virtual permite a interação direta com objetos como tecidos e instrumentos cirúrgicos, simulando procedimentos realistas.

O design da interface priorizou a usabilidade, permitindo que o usuário interaja com o bisturi virtual e execute operações simuladas de maneira natural. O uso do feedback tátil associado ao corte virtual reforça a imersão perceptiva e realismo durante as atividades.

A Figura 8 apresenta uma visão do ambiente desenvolvido, mostrando as malhas tridimensionais do modelo humano virtual utilizado nas simulações.

Figura 8 - Modelo humano virtual com suas malhas visíveis no unity



Fonte: Autor, 2025.

3 RESULTADOS

Para avaliar a precisão e a sensibilidade dos sensores embarcados, foram realizados testes controlados de movimentação utilizando ângulos conhecidos de inclinação e rotação. O objetivo foi verificar o quanto o movimento captado pelos sensores (acelerômetro analógico ADXL335 e giroscópio digital integrado ao nRF52840) correspondem ao movimento real aplicado no bisturi físico, refletido posteriormente no ambiente virtual. Durante os testes, foram registradas leituras em três eixos

para aceleração e três para rotação, com amostragem contínua via BLE. A Tabela 1 apresenta os erros médios absolutos (EMA) para cada eixo, comparando o movimento esperado com o movimento reportado no Unity:

Tabela 1 – Erros médios absolutos de cada eixo

| Eixo | Erro médio Absoluto (g ou °) | Desvio Padrão | Observações |
|-----------------------|------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| Acelerômetro X | 0,12g | 0,04g | Leve ruído em baixa amplitude |
| Acelerômetro Y | 0,09g | 0,03g | Estável após calibração |
| Acelerômetro Z | 0,15g | 0,05g | Maior sensibilidade à vibração |
| Giroscópio X | 1,8° | 0,9° | Responde bem a rotações rápidas |
| Giroscópio Y | 2,1° | 1,0° | Sujeito a drift sem correção |
| Giroscópio Z | 1,4° | 0,8° | Boa linearidade nas rotações planas |

Fonte: Autor, 2025.

Para um dispositivo BLE com bateria, é crucial o baixo consumo de energia, para medir esse consumo de energia, foi realizado a medição de corrente dos principais componentes do circuito.

O bisturi foi conectado via BLE para transmitir continuamente os dados de movimentação e os motores de vibração foram acionados periodicamente, simulando um cenário de uso mais intenso. O dispositivo operou de forma estável por 10 horas, enviando essas informações de maneira ininterrupta. A Tabela 2 apresenta o consumo de corrente dos componentes.

Tabela 2 – Consumo de corrente dos componentes

| Teste realizado por 10h (até esgotamento da bateria) | | | |
|--|-----------------|------|-------------|
| Componente | Corrente máxima | mA | Consumo mAh |
| Motor 1 | 90mA | 90,0 | 193,50 |
| Motor 2 | 90mA | 90,0 | 193,50 |
| Módulo XIAO | 10mA | 10,0 | 100,00 |
| ADXL335 | 350uA | 0,35 | 3,50 |
| Botão | 330uA | 0,33 | 0,66 |
| | | | 491,16 |

Fonte: Autor, 2025.

Cada tipo de tecido simulado (pele, músculo e osso) foi mapeado a um padrão específico de vibração, de modo a proporcionar ao usuário sensações distintas durante o corte virtual. A intensidade e a duração da vibração foram determinadas com base na densidade e resistência do tecido, conforme representado na Tabela 3.

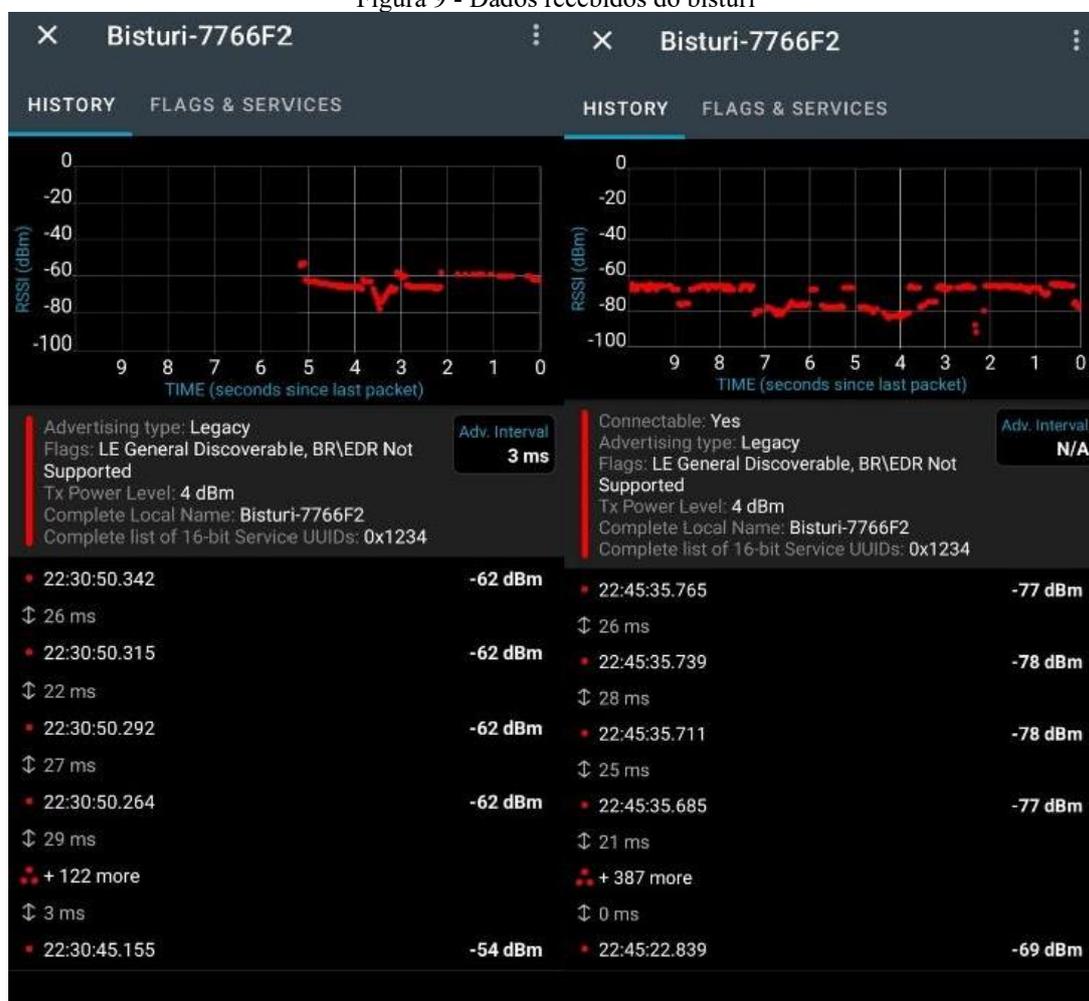
Tabela 3 – Comparação entre o sistema de vibração

| Eixo | Intensidade (PWM) | Duração (ms) | Observações |
|----------------|-------------------|--------------|-----------------------------|
| Pele | 50% | 250 | Vibração leve e contínua |
| Músculo | 75% | 500 | Vibração média e contínua |
| Ossos | 100% | 1000 | Vibração intensa e contínua |

Fonte: Autor, 2025.

Foram realizados testes com envio contínuo de pacotes por cerca de 10 minutos em diferentes distâncias. Não foi observada perda significativa de pacotes nos testes com até 2 metros de distância e sem interferência direta de outros dispositivos BLE. A integridade dos dados foi preservada em mais de 99,8% dos casos, o que corrobora a confiabilidade da solução. A figura 9 apresenta os resultados obtidos, os pontos em vermelho no gráfico representam os pacotes que foram recebidos, cada pacote possui todas as informações (acelerômetro (X, Y e Z), giroscópio (X, Y e Z), botões pressionados e temperatura do módulo), os valores em dBm representam a intensidade do sinal recebido (possui relação com a distância, quanto melhor o valor, maior a distância entre os dispositivos) e por fim os valores em milissegundos (ms), representam a latência (diferença de tempo entre envio e recebimento do pacote). Os testes realizados indicaram latência média de 22 milissegundos para comunicação BLE.

Figura 9 - Dados recebidos do bisturi



Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 4 apresenta uma comparação entre o sistema desenvolvido neste trabalho e outros dispositivos similares encontrados na literatura, com destaque para parâmetros como tipo de conexão, sensores utilizados, presença de feedback tátil e integração com plataformas 3D interativas.

Tabela 4 – Comparação entre sistemas desenvolvidos

| Projeto / Referência | Conexão | Feedback Tátil | Integração com VR | Sensores utilizados | Observações |
|--|----------------|-----------------------|--------------------------|--|--|
| Sistema de simulação cirúrgica (Li et al., 2022) | USB | Sim | Sim | Força, movimento, resposta tátil | Utiliza dispositivo com resistência simulada para cortes |
| Simulador de Laparoscopia (Abinaya, 2023) | Cabo serial | Sim | Sim | Força, acelerômetro | Grande estrutura física, sem portabilidade |
| Dispositivo Luva Háptica (Sense Gloove, 2023) | BLE | Sim | Sim | Flex, vibração, IMU | Usado como luva; não simula bisturi |
| Bisturi VR (Este trabalho) | BLE | Sim | Sim | Acelerômetro analógico, giroscópio digital, vibração | Portátil, customizável, uso com Meta Quest 2 |

Fonte: Autor, 2025.

Esses resultados demonstram que o sistema pode ser suficientemente rápido e robusto para aplicações de treinamento cirúrgico com feedback sensorial em tempo real.

4 DISCUSSÃO

A avaliação de desempenho dos sensores demonstrou que o acelerômetro analógico (ADXL335) apresentou maior sensibilidade à vibração no eixo Z, enquanto o giroscópio integrado ao módulo nRF52840 apresentou maior suscetibilidade a desvios acumulados (drift) no eixo Y, particularmente em movimentos prolongados. Esses desvios podem ser minimizados com a aplicação de filtros complementares ou fusão sensorial, o que representa uma possibilidade de melhoria futura.

A autonomia de 10 horas de operação contínua foi obtida mesmo com acionamento periódico dos motores de vibração e transmissão contínua de dados via BLE, o que evidencia o equilíbrio entre consumo energético e desempenho do sistema. A análise do consumo de corrente por componente evidenciou que os motores de vibração representam a maior parcela do consumo energético.

A arquitetura baseada no protocolo GATT possibilitou a definição de serviços e características BLE customizadas que permitiram a segmentação de dados em canais distintos, otimizando o envio de informações sensoriais (aceleração, rotação, botões) e o recebimento de comandos hápticos (intensidade e duração do PWM dos motores). Essa estrutura modular favoreceu a escalabilidade do sistema, podendo ser expandida para incluir novas características ou comandos adicionais sem comprometer a estabilidade da comunicação.

A revisão bibliográfica permitiu identificar que, embora haja ampla literatura sobre dispositivos hápticos e simuladores médicos baseados em realidade virtual, nenhum estudo relata a construção e validação de bisturis físicos com comunicação sem fio e resposta tátil integrada a ambientes imersivos em tempo real. A maioria dos dispositivos descritos na literatura, como simuladores de laparoscopia ou luvas hápticas, utilizam estruturas físicas maiores ou sistemas com menor portabilidade, e com integração limitada a plataformas móveis como o Meta Quest 2.



O sistema de feedback háptico projetado neste trabalho mapeou diferentes camadas de tecido (pele, músculo, osso) para padrões distintos de vibração, utilizando modulação por largura de pulso (PWM) e controle de duração. Essa abordagem possibilitou a diferenciação tátil entre os tipos de tecido representados na simulação virtual. A implementação prática mostrou consistência na ativação dos atuadores conforme os eventos de corte registrados no Unity, com sincronização adequada à resposta visual e tátil.

A integridade dos pacotes de dados recebidos foi superior a 99,8% durante sessões contínuas de teste com duração de até 10 minutos e distância de até 2 metros. A latência média observada foi de 22 ms, valor compatível com os requisitos mínimos para aplicações de simulação interativa em realidade virtual. A comparação com sistemas similares indicou que o presente projeto apresenta características complementares, como a utilização de sensores mistos (analógico e digital), feedback tátil por vibração e integração completa com o Meta Quest 2 via BLE, não exigindo conexão com computador por cabo USB.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram possibilidades de aprimoramento em termos de filtragem de sinais e adaptação do ambiente virtual a diferentes contextos cirúrgicos simulados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um bisturi cirúrgico háptico com comunicação Bluetooth Low Energy, integrado a um ambiente de realidade virtual imersiva baseado no Meta Quest 2. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência do sistema em termos de latência, precisão sensorial, robustez de comunicação e autonomia energética.

Uma das principais inovações deste trabalho é a implementação de um sistema de feedback tátil em tempo real, associado à simulação de cortes em diferentes camadas anatômicas no ambiente virtual, utilizando deformações do Unity. A resposta háptica foi realizada por dois motores de vibração controlados por PWM, ativados via comandos BLE recebidos pelo bisturi físico. A baixa latência observada permitiu a interação em tempo real entre o usuário e o ambiente virtual, sendo adequada para aplicações de treinamento cirúrgico.

A modularidade do dispositivo e a arquitetura adotada permitem a futura expansão para funcionalidades adicionais, como a adaptação automática do feedback háptico via algoritmos de aprendizado de máquina, ou a extensão da aplicação para outras áreas da saúde e treinamento técnico.

Em conclusão, o protótipo desenvolvido representa um avanço potencial para tecnologias de ensino baseadas em simulação imersiva, oferecendo uma solução eficaz, acessível e adaptável para treinamento médico e aplicações correlatas.



AGRADECIMENTOS

Ao FIT Instituto de Tecnologia de Sorocaba no âmbito do projeto PPI-SOFTEX, coordenado pela Softex e publicado Residência em TIC 03 - Aditivo, DOU 01245.013770/2020-64, apoiado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, com recursos da Lei nº 8.248, de 23 de outubro de 1991.



REFERÊNCIAS

A. E. Mostafa, E. Sharlin and M. C. Sousa, Poster: Superhumans: A 3DUI design metaphor, 2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), Minneapolis, MN, USA, 2014, pp. 143-144, doi: 10.1109/3DUI.2014.6798861.

A. Fonnet and Y. Prié, Survey of Immersive Analytics, 2021 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 27, no. 3, pp. 2101-2122, 1 March 2021, doi: 10.1109/TVCG.2019.2929033.

Mirza, T. Tuli, N. e Mantri, A. 2022. Aplicações de realidade virtual, realidade aumentada e realidade mista: cenário atual, 2ª Conferência Internacional sobre Computação Avançada e Tecnologias Inovadoras em Engenharia (ICACITE) , Greater Noida, Índia, 2022, pp. 1405-1412, doi: 10.1109/ICACITE53722.2022.9823482. Acesso em 03 jul. 2024.

Xu, X., Kilroy, D., Kumar, A., Iqbal, M.Z., Mangina, E., Campbell, A.G. 2023. Mixed Reality Applications in Tertiary Veterinary Education: A Systematic Review. In: Cai, Y., Mangina, E., Goei, S.L. (eds) Mixed Reality for Education. Gaming Media and Social Effects. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4958-8_10. Acesso em 03 jul. 2024.

Chaabra, S. and Baweja, H. 2023. Applications of Augmented Reality, Virtual Reality and Mixed Reality in Urological Interventions: A Systematic Review. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). ISSN: 2321-965. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.56524>. Acesso em 03 jul. 2024.

González, I. S. Vivo, V. C., Juanes, M. J.A., Palau, R. 2020. Virtual Reality In Higher Education: An Experience With Medical Students: Research into how Virtual Reality can be used as a powerful training tool for medicine students. In Eighth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality. Oct 21 (pp. 414-421).

Xie, B., Liu, H., Alghofaili, R., Zhang, Y., Jiang, Y., Lobo, F. D., & Yu, L. F. (2021). A review on virtual reality skill training applications. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 645153.

A. Li, Y. Chen, S. Ni, J. Chen and L. Zhou, Haptic Signal Reconstruction in eHealth Internet of Things, 2022 IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 18, pp. 17047-17057, 15 Sept.15, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3132771.

T. M. Takala, P. Rauhamaa and T. Takala, Survey of 3DUI applications and development challenges, 2012 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), Costa Mesa, CA, USA, 2012, pp. 89-96, doi: 10.1109/3DUI.2012.6184190.

M. Bektic, A. Tischler, N. Fahey, K. Kim and L. Onesko. 2021. Efficacy of AR Haptic Simulation for Nursing Student Education, 4th International Conference on Bio-Engineering for Smart Technologies (BioSMART), Paris / Créteil, France, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/BioSMART54244.2021.9677828.

Ludlow, B. L. 2015. Virtual Reality: Emerging Applications and Future Directions. *Rural Special Education Quarterly*, 34(3), 3-10. <https://doi.org/10.1177/875687051503400302>. Acesso em 02 jul. 2024.

Ong, C. W.; Tan, M. C. J.; Lam, M.; & Koh, V. T. C. 2021. Applications of Extended Reality in Ophthalmology: Systematic Review. *Journal of medical Internet research*, 23(8), e24152. <https://doi.org/10.2196/24152>. Acesso em 02 jul. 2024.



Le Noury, P., Polman, R., Maloney, M. et al. A Narrative Review of the Current State of Extended Reality Technology and How it can be Utilised in Sport. *Sports Med* 52, 1473–1489 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01669-0>. Acesso em 02 jul. 2024.

Pons P, Navas-Medrano S e Soler-Dominguez JL. 2022. Realidade estendida para saúde mental: tendências atuais e desafios futuros. *Front. Comput. Sci.* 4:1034307. doi: 10.3389/fcomp.2022.1034307. Acesso em 02 jul. 2024.

Palmas, F. and Klinker G. 2020. Defining Extended Reality Training: A Long-Term Definition for All Industries, 2020 IEEE 20th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), Tartu, Estonia, 2020, pp. 322-324, doi: 10.1109/ICALT49669.2020.00103. Acesso em 02 jul. 2024.

Eckert M, Volmerg J, Friedrich C. 2019. Augmented Reality in Medicine: Systematic and Bibliographic Review. *JMIR Mhealth Uhealth* 2019;7(4):e10967. <https://mhealth.jmir.org/2019/4/e10967>. DOI: 10.2196/10967. Acesso em 02 jul. 2024.

Tokarchuk L, Ratcliffe J, Hoover M, Men L, Ortega FR and Bryan-Kinns N. 2023. Editorial: Remote XR user studies. *Front. Comput. Sci.* 5:1144109. doi: 10.3389/fcomp.2023.1144109. Acesso em 02 jul. 2024.

Fialho, A. B. 2018. Realidade Virtual e Aumentada Tecnologias para Aplicações Profissionais. Editora: Érica 1ª edição. pp 11-20.

Vince, J. 2004. Introduction to virtual reality. Springer Science & Business Media, 2004. Disponível em: Introduction to Virtual Reality - John Vince - Google Books.

Brigham, T. J. 2017. Verificação da realidade: noções básicas de realidade virtual aumentada e realidade mista, *Medical Reference Services Quarterly*, vol. 36, no. 2, pp. 171-178, abr. 2017.

Marks, B., Thomas, J., 2022. Adoption of virtual reality technology in higher education: An evaluation of five teaching semesters in a purpose-designed laboratory. *Education and Information Technologies*, 27(1), pp.1287–1305. <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10653-6>. Acesso em 03 jul. 2024.

Huang, S. Daqing, QI. Yuan, J. Huawei, TU. 2019. Review of studies on target acquisition in virtual reality based on the crossing paradigm, *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, Volume 1, 2019, pp. 251-264, ISSN 2096-5796, <https://doi.org/10.3724/SP.J.2096-5796.2019.0006>.

Tu, H. W. Huang, S. S. Yuan, J. B. Ren, X. S. Tian, F. 2019. Crossing-based selection with virtual reality head-mounted displays. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, New York, NY, USA (2019). DOI:10.1145/3290605.3300848.

Dai, K., Garcia, J., Olave-Encina, K., 2023. In-between worlds: Chilean university lecturers' experiences of teaching transition between face-to-face and virtual reality contexts during the COVID-19 pandemic. *Education technology research and development*. <https://doi.org/10.1007/s11423-023-10217-0>. Acesso em 03 jul. 2024.

Wong CL, Li CK, Choi KC, So WKW, Kwok JYY, Cheung YT, et al. 2021. Effects of immersive virtual reality for preventing and managing anxiety, nausea and vomiting among paediatric cancer patients receiving their first chemotherapy: a study protocol for an exploratory trial. *PloS One*. 2021;16(10):e0258514. Acesso em 03 jul. 2024.



Kyaw, BM. Saxena, N. Posadzki, P. Vseteckova, J. Nikolaou, CK. George, PP. et al. 2019. VR for health professions education: systematic review and meta-analysis by the Digital Health Education Collaboration. J Med Internet Res 2019; 21 (1):e12959.

Microsoft, 2023. O que é realidade misturada? Disponível em: <https://learn.microsoft.com/pt-br/windows/mixed-reality/discover/mixed-reality>. Acesso em 03 jul. 2024.

Roo, S. e Hachet, M. 2017. Uma realidade: aumentando a maneira como o mundo físico é vivenciado pela combinação de múltiplas modalidades de realidade mista, UIST 2017 - Anais do 30º Simpósio Anual da ACM sobre Software e Tecnologia de Interface de Usuário , pp. 787-795, outubro de 2017. Acesso em 03 jul. 2024.

Sanna, A. Manuri F. e Pace, F. 2019. Edição especial Aplicações de realidade aumentada e mista vestíveis, 2019.

Tepper, O. M., Rudy, H. L., Lefkowitz, A., Weimer, K. A., Marks, S. M., Stern, C. S., & Garfein, E. S. 2017. Mixed reality with HoloLens: where virtual reality meets augmented reality in the operating room. Plastic and reconstructive surgery, 140(5), 1066-1070.

Vávra, P., Roman, J., Zonča, J., Ihnát, P., Němec, P., Kumar, M., Habib, J. N., El-Gendi, A. 2017. Recent Development of Augmented Reality in Surgery: A Review. Journal of Healthcare Engineering. 10.1155/2017/4574172.

Analog Devices, 2022. ADXL335 Datasheet. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>. Acesso em 05 ago. 2024.

InvenSense, 2023. MPU-6050 Product Specification. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>. Acesso em 05 ago. 2024.

STMicroelectronics, 2023. LSM6DS3TR-C: iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope. Disponível em: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm6ds3tr-c.html>. Acesso em 05 ago. 2024.

Meta, 2019. Meta quest 2 overview. Disponível em: <https://www.meta.com/quest/products/quest-2/>. Acesso em 02 jul. 2024.

Meta, 2020. Oculus Quest 2 - Advanced All-In-One Virtual Reality Headset. Disponível em: <https://www.meta.com/quest/>. Acesso em 02 jul. 2024.

Meta, 2021. Unlock Your PC Power with Oculus Link. Disponível em: <https://www.meta.com/quest/setup/oculus-link/>. Acesso em 02 jul. 2024.

Nordic, 2024. XIAO BLE Sense. Disponível em: https://docs.nordicsemi.com/bundle/ncs-2.5.2/page/zephyr/boards/arm/xiao_ble/doc/index.html. Acesso em 02 jul. 2024.

SEED Studio, 2023. Introdução ao XIAO nRF52840 Sense. Disponível em: https://wiki.seeedstudio.com/XIAO_BLE/. Acesso em 02 jul. 2024.

Qodenext, 2023. A Complete Guide to What is BLE (Bluetooth Low Energy). Disponível em: www.qodenext.com. Acesso em 10 set. 2024.



Stormotion, 2024. Bluetooth Low Energy: Full BLE FAQ. Disponível em: www.stormotion.io. Acesso em 10 set. 2024.

Unity Technologies, 2023. Unity Game Engine Overview. Disponível em: <https://unity.com/>. Acesso em 03 jul. 2024.

Cervantes, D. (2021). Game Development with Unity: An In-Depth Guide to Creating Interactive Experiences. Packt Publishing.

McFadden, C. (2020). Learning C# by Developing Games with Unity 2020. Packt Publishing.

Unity Technologies, 2022. XR Interaction Toolkit. Disponível em: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.interaction.toolkit@2.0/manual/index.html>. Acesso em 03 jul. 2024.

Thompson, A.; Smith, J. 2021. Haptic Feedback in Virtual Reality Applications: A Comprehensive Overview. 2021 Journal of Immersive Technology, 12(4), 89-101.

Goldstone, W. (2020). Unity 2020 From Zero to Proficiency: A Complete Guide to Master Unity Development. Apress.

Taleb, T., Sehad N., Nadir Z., Song, J. 2023. VR-Based Immersive Service Management in B5G Mobile Systems: A UAV Command and Control Use Case. IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 6, pp. 5349- 5363. 10.1109/jiot.2022.

Bluetooth, 2024. The Bluetooth® Low Energy Primer. Disponível em: www.bluetooth.com. Acesso em 10 set. 2024.

STMicroelectronics, 2023. L3GD20 3-Axis Digital Gyroscope. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l3gd20.pdf>. Acesso em 05 ago. 2024.