

Cinto Háptico Flexível: Design de um Novo Dispositivo Vestível para Jogos Eletrônicos

Flexible Haptic Belt: Design of a New Wearable Device for Electronic Games

Franklin Matheus da Costa Lima, Leonardo Cunha de Miranda

Departamento de Informática e Matemática Aplicada
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
59078-900 – Natal, RN – Brasil

franklinmatheus@ufrn.edu.br, leonardo@dimap.ufrn.br

Abstract. Introduction: In digital games, conventional controllers, although effective, limit player's natural movements. Wearable devices can enhance immersion, but present challenges regarding anatomical fit and hygiene. **Objective:** This work presents Flexible Haptic Belt, a wearable device that combines input and output modalities, is modular, and features open-source hardware and software designs. **Methodology:** Supported by Organizational Semiotics, the device's conception encompassed product design, interaction design, in addition the construction of a prototype. **Results:** The belt operates in a hybrid way, integrating the capture of body movements and touch with emission of haptic feedback. The belt frees the player's hands, being able to act as a primary or complementary controller, and utilizes modularity to support anatomical customization and hygiene.

Keywords: Haptic Feedback; Haptic Interface; Interaction; Digital Games.

Resumo. Introdução: Em jogos digitais, controles convencionais, apesar de eficazes, limitam os movimentos naturais do jogador. Dispositivos vestíveis podem ampliar a imersão, mas possuem desafios de adaptação anatômica e higienização. **Objetivo:** Este trabalho apresenta o Cinto Háptico Flexível, um novo dispositivo vestível que combina formas de entrada e saída, é modular e possui seus projetos de hardware e software abertos. **Metodologia:** Apoiada na Semiótica Organizacional, o processo de design e desenvolvimento do vestível articulou o design conceitual, o design de produto e o design de interação para, por fim, concretizar o design em um protótipo do cinto háptico. **Resultados:** O dispositivo vestível atua de forma híbrida, integrando a captura da movimentação corporal e toques à emissão de respostas hápticas. O dispositivo vestível libera as mãos do jogador, podendo atuar como controle principal ou complementar, utilizando a modularidade do seu projeto para trazer flexibilidades quanto a personalização de uso, customização anatômica, e higienização.

Palavras-chave: Feedback Háptico; Interface Háptica; Interação; Jogos Digitais.

1. Introdução

Nos últimos anos, os jogos digitais têm alcançado níveis de realismo sem precedentes, impulsionados pela evolução gráfica e pela popularização de ambientes imersivos em Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) [Bachmann et al. 2018]. Entretanto,

a mediação entre o jogador e o ambiente virtual ainda é feita, predominantemente, por dispositivos convencionais, como mouses e teclados em computadores, ou joysticks em consoles de videogame. Embora eficazes e consolidados, esses dispositivos exigem a ocupação contínua das mãos, o que restringe a liberdade motora e cria uma barreira para a plena imersão do jogador, especialmente em simuladores e jogos de ação em primeira pessoa, ou em ambientes de RV e RA [Pei et al. 2022].

Os dispositivos vestíveis surgem, nesse cenário, como uma alternativa promissora para interações mais naturais e imersivas. Ao explorar os movimentos corporais do jogador como gatilho para *feedbacks* hápticos, esses dispositivos reforçam a relação entre ação e resposta sensorial, contribuindo para experiências mais envolventes em ambientes imersivos [Park et al. 2025, DeVrio e Harrison 2025]. A combinação de estímulos vibrotáteis com outros canais de *feedback* torna as interações em ambientes virtuais mais ricas e expressivas [Magalhães et al. 2025], reforçando a sensação de presença e a imersão do jogador [Preechayasomboon e Rombokas 2021]. No entanto, grande parte das soluções vestíveis orienta-se, predominantemente, à saída, oferecendo *feedback* háptico e explorando poucas opções de entrada [Pacchierotti et al. 2017, Yin et al. 2021]. Apesar dos avanços recentes em interfaces vestíveis para jogos, ainda existem poucos dispositivos que integram opções de entrada e saída de forma equilibrada.

Neste contexto, este trabalho apresenta um novo dispositivo vestível que atua de forma bidirecional, integrando a captura da movimentação corporal do jogador e entradas em superfícies sensíveis ao toque, e fornecendo respostas hápticas com direção customizável em torno do tronco do jogador. Sua arquitetura modular facilita a adaptação a diferentes jogadores e higienização, fatores essenciais em dispositivos vestíveis.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados; a Seção 3 descreve a metodologia empregada; a Seção 4 detalha o design e a construção do dispositivo vestível; a Seção 5 discute os resultados e sinaliza as limitações do trabalho; e, por fim, a Seção 6 conclui o artigo.

2. Trabalhos Relacionados

Observa-se que dispositivos em formato de “cinto” veem sendo explorados como meio de interação com sistemas digitais. Assim, os trabalhos relacionados foram buscados via Google Scholar utilizando os termos “*haptic belt*”, “*vibrotactile belt*”, “*smart belt*”, e “*haptic strap*”. No contexto de jogos e RV/RA, Murtinger et al. (2023) propõem um cinto para o treinamento policial que atua, essencialmente, como canal de saída tátil e manipulação física. Bourachot et al. (2023) investigam um cinto comercial que converte o áudio do jogo em vibrações corporais. Já Greinacher et al. (2020) utilizam um cinto com uma matriz de motores de vibração posicionados na lombar para guiar, via *feedback* háptico, a sincronização da respiração do jogador num *exergame* de remo em VR.

Em contextos assistivos, cintos e faixas hápticas também são empregados para auxiliar na navegação de pessoas com deficiência visual. Katzschmann et al. (2018) apresentam um sistema composto por um cinto com sensores de distância e uma faixa com motores de vibração. Esta faixa, posicionada na altura do abdômen, traduz distâncias de obstáculos em retornos hápticos direcionais. Brandebusemeyer et al. (2021) avaliam um cinto vibrotátil que sinaliza continuamente a direção do norte por meio de motores distribuídos ao redor da cintura. Outros estudos exploram cintos vestíveis em domínios distintos, como na orientação de pessoas cegas em ambientes urbanos [Flores et al. 2015];

na interação com outros dispositivos [Stylianidis et al. 2017]; no monitoramento corretivo da postura [Gopalai e Senanayake 2011, Tlili et al. 2022]; e no suporte contínuo ao equilíbrio e à marcha [Xu et al. 2017, Kingma et al. 2019].

Apesar dessa diversidade de aplicações, a maioria dos “cintos inteligentes” limitam-se a uma única via de interação, atuando apenas entrada ou saída. O dispositivo apresentado neste trabalho explora uma abordagem de interação bidirecional, integrando, num único cinto modular, retorno háptico direcional com a captura da movimentação corporal e o contato com áreas sensíveis ao toque. Além disso, seu design foi projetado de forma modular, pensado para facilitar higienização e adaptação a múltiplos jogadores.

3. Metodologia

O projeto do dispositivo vestível iniciou com o emprego do Método de Articulação de Problemas (PAM, do inglês, Problem Articulation Method) da Semiótica Organizacional (SO) [Liu 2000]. Partindo da ideia de se desenvolver “uma nova forma de interação”, a aplicação do PAM nas fases iniciais do projeto foi fundamental para se chegar ao cinto háptico apresentado neste artigo. Foram utilizados os três seguintes artefatos do PAM da SO: (i) o Partes Interessadas (PI), visando identificar *stakeholders* do projeto e suas influências; (ii) o Quadro de Avaliação (QA), com o intuito de levantar problemas e sugerir ideias de soluções a partir das partes interessadas; e (iii) a Escada Semiótica (ES), a fim de identificar e organizar questões numa perspectiva sócio-técnica. A SO possui um emprego consolidado em variados domínios, p. ex., redes sociais [Santana et al. 2009], artefatos físicos de interação para TV digital [Miranda e Baranauskas 2009, Miranda et al. 2008, 2010, 2011a, 2011b, 2011c], laptops educacionais [Miranda et al. 2007, Arantes et al. 2012], e controles para jogos [Miranda et al. 2013, Brizolara et al. 2022, 2023].

Num primeiro momento, esses artefatos da SO foram produzidos apenas pela equipe do projeto e, numa segunda etapa, visando expandir a visão dos seus membros, todos esses artefatos foram “recriados” com o apoio de uma Inteligência Artificial (IA) Generativa, ou seja, o ChatGPT-4o (Omni). Assim, nesse segundo momento, o pesquisador responsável atuou como o interlocutor com a IA, sendo o curador da conversa visando preencher e organizar a nova versão do PI, do QA e da ES. Após reflexão acerca dos artefatos da SO produzidos, a equipe do projeto chegou ao conceito do “cinto”, um vestível com retorno háptico e que conta com flexibilidades de uso diferenciando-o, portanto, de outros cintos hápticos já desenvolvidos.

Com apoios pontuais de IA, as próximas etapas de design e desenvolvimento envolveram a especificação dos requisitos, a definição do design conceitual, a elaboração do design de produto, e a especificação do design de interação. Ainda, foi produzido a especificação eletrônica, realizado a definição da arquitetura e o desenvolvimento de software, e, por fim, a construção do protótipo do dispositivo vestível.

4. O Cinto Háptico Flexível

O Cinto Háptico Flexível, do inglês Flexible Haptic Belt (ou simplesmente HaptFlelt), é um dispositivo vestível que proporciona uma interação multimodal com jogos. O dispositivo atua como um canal de entrada, identificando a movimentação corporal do jogador e o contato tátil em áreas específicas ao redor do cinto, que são sensíveis ao toque. Simultaneamente, atua como um canal de saída, fornecendo respostas hápticas a fim de aumentar a imersão do jogador por meio de estímulos sensoriais.

O dispositivo foi concebido para ser utilizado sozinho, ou de forma conjugada com um joystick de videogame ou um dispositivo de entrada convencional, como teclado e mouse. Este dispositivo vestível proporciona uma interação, predominantemente, baseada em “mãos-livres”, permitindo que o jogador interaja com o ambiente virtual do jogo sem precisar ficar segurando um controle.

4.1. Requisitos

Os requisitos (R_i) especificados para o dispositivo abrangem suas capacidades funcionais e características físicas necessárias para atender a critérios de qualidade. Em relação as “entradas” do dispositivo, o sistema deve prover dois modos: (R1) o movimento corporal do jogador, que compreende inclinações do tronco para frente, para trás e para os lados, além de agachamentos e saltos; e (R2) o contato tátil em áreas sensíveis ao toque, que podem ser acionadas utilizando os membros superiores do jogador. Já as “saídas” do dispositivo possuem dois propósitos distintos: indicar o status do sistema e funcionamento do dispositivo através de emissões (R3) luminosas e (R4) sonoras; e (R5) fornecer um retorno háptico distribuído ao redor do corpo do jogador.

Visando proporcionar liberdade de movimentação ao jogador, o dispositivo vestível deve ser (R6) alimentado por bateria recarregável, e a comunicação de dados entre o dispositivo e o computador (ou console) ao qual esteja conectado deve ser (R7) realizada via conexão sem fio. Os requisitos físicos determinam que o cinto háptico seja (R8) ajustável a cada jogador, e (R9) construído de forma modular para que seus componentes possam ser reorganizados. Essa característica também permite a (R10) melhor higienização do cinto, que também é um requisito relevante se tratando de um dispositivo vestível de potencial uso intenso e compartilhado.

4.2. Design Conceitual

A concepção do cinto háptico priorizou aspectos ergonômicos para garantir que o dispositivo não imponha restrições de movimentos ao jogador. O cinto háptico conta com uma base têxtil elástica confortável e de comprimento ajustável, capaz de se adequar a diferentes biotipos (cf. R8) e garantir estabilidade no tronco, mesmo diante de movimentos bruscos, como pular. Visando um uso natural e fluído, a interação baseia-se, principalmente, na movimentação corporal do jogador (cf. R1), além de possuir áreas sensíveis ao toque que podem ser acionadas de forma intuitiva através do tato com o uso do(s) dedo(s), da palma da mão, do antebraço ou do cotovelo (cf. R2).

Uma decisão de projeto fundamental é a sua modularidade (cf. R9). Todos os componentes da solução são encapsulados em módulos que podem ser facilmente acoplados, ou removidos, pelo jogador. Entre outras vantagens (p. ex., customização e manutenção), esta característica facilita o processo de limpeza do dispositivo (cf. R10). Após as sessões de uso, o jogador pode remover os módulos visando higienizar a base elástica de forma segura, sem medo de danificar o dispositivo.

Com base nessas premissas, chegou-se ao design conceitual do Cinto Háptico Flexível (Figura 1). A estrutura geral do dispositivo vestível conta com seis módulos, sendo um módulo principal (que contém embarcado o núcleo do sistema e a bateria recarregável, além de fornecer retorno háptico e *feedbacks* luminosos e sonoros) e mais cinco módulos auxiliares. Esses módulos, que complementam e geram flexibilidades de uso à solução, são de três tipos: (i) módulo háptico (1 unidade), que fornece apenas saída

háptica; (ii) módulos de toque (2 unidades) que permite, exclusivamente, entrada sensível ao toque; e (iii) módulos híbridos (2 unidades), que conta com entrada por toque conjugado com retorno háptico.

Visando garantir uma melhor experiência sensorial ao jogador aproximando o ambiente virtual às sensações do mundo real, os módulos que possuem retorno háptico foram idealizados para serem dispostos no cinto nos quatro pontos de cardeais, isto é, o módulo principal à (N)orte, o módulo háptico ao (S)ul, e os módulos híbridos a (L)este/(O)este. Nessa configuração, as respostas hápticas são realizadas através de motores de vibração de um ou mais módulos que podem vibrar, individualmente ou simultaneamente, com diferentes intensidades e durações (cf. R5). Complementarmente, os módulos de toque ficam dispostos perto dos pontos colaterais Nordeste (NE) e Noroeste (NO) que são regiões, nesse esquema de uso, bem naturais para o acionamento tátil das áreas capacitivas (cf. R2).

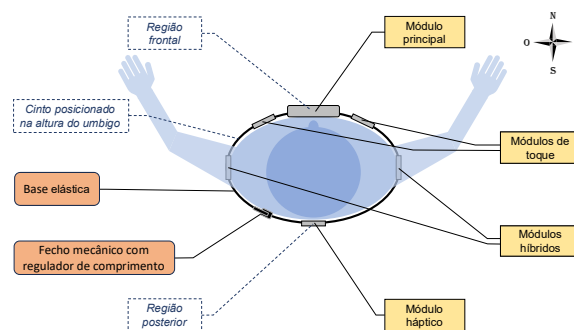


Figura 1. Design conceitual do Cinto Háptico Flexível.

Cabe ressaltar que, apesar da indicação do layout supradescrito, os módulos podem ser alocados em qualquer posição do cinto, pois não possuem posições fixas. Essa característica garante personalização na configuração do dispositivo vestível, permitindo que o jogador reconfigure o layout dos módulos livremente e, desse modo, adapte o dispositivo às suas preferências ou às demandas do jogo.

4.3. Design de Produto

O próximo passo foi criar modelos 3D do Cinto Háptico Flexível, que foram desenvolvidos pelos autores deste trabalho na ferramenta de modelagem Blender.

A Figura 2 apresenta o design de produto do dispositivo vestível e de seus acessórios. Cada um dos módulos que permite entrada tátil (i.e., os módulos de toque, e os híbridos) possuem “rótulos” com diferentes formas geométricas. Esses rótulos visam facilitar o uso do dispositivo pelo jogador e permitir o seu uso personalizado em diferentes jogos. Conforme demonstrado na Figura 2a, o rótulo dos dois módulos de toque adota formatos geométricos não preenchidos, isto é, círculo (○) e quadrado (□). Já o rótulo dos dois módulos híbridos adota formas preenchidas (visando indicar a existência do retorno háptico), ou seja, triângulo (▲) e estrela (★).

Os “rótulos” são integrados à superfície sensível ao toque, que compreende toda a face frontal do módulo. Esta superfície é translúcida, permitindo que a luz emitida por LED interno ilumine o rótulo para sinalizar diferentes status do módulo e do sistema (cf. R3). O LED do módulo principal utiliza as cores para indicar: inicialização (verde); pareamento (azul); e status ou nível da bateria (vermelho). Nos módulos de toque e híbridos, uma luz branca alterna a intensidade entre suave (módulo ligado) e intensa

(toque detectado). O módulo principal também fornece retorno sonoro, sinalizando confirmações de sistema (bipes curtos) e alertas de falhas (bipes longos).

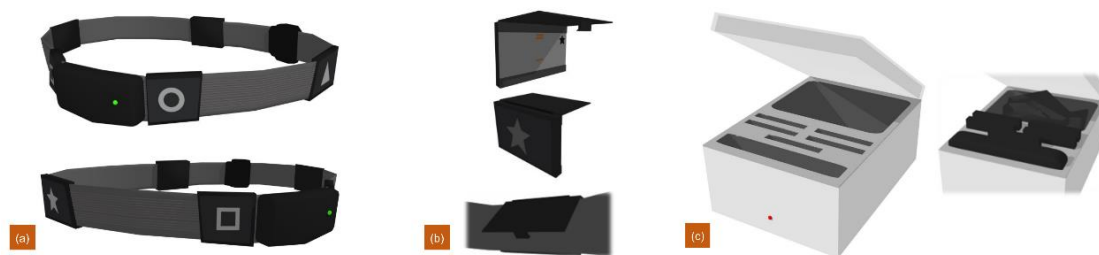


Figura 2. Design de produto do dispositivo vestível e seus acessórios: (a) duas diferentes perspectivas do cinto háptico; (b) módulo híbrido-estrela visto de frente, de costas e sendo acoplado; e (c) estojo para guardar o produto.

A base têxtil elástica do cinto possui “entrelaçada” trilhas metálicas condutivas e maleáveis ao longo de toda a sua extensão que fornecem corrente elétrica e permitem a conexão entre todos os módulos dispensando, portanto, o uso de bateria para cada um dos módulos auxiliares. Sobre essa base, conforme demonstrado na Figura 2b, os módulos são acoplados por um “clipe articulado” com trava física, que “abraça” o cinto para garantir estabilidade e facilitar o seu acoplamento/remoção. Na parte posterior, é possível observar o mecanismo do “clipe articulado” para fixação e as superfícies de contato que se conectam às trilhas condutivas da base elástica.

A Figura 2c ainda detalha o estojo projetado para ser utilizado para guardar o dispositivo vestível quando não estiver em uso. Este acessório foi concebido para atuar como estação de armazenamento, transporte e carga do dispositivo. Seu interior conta com sete compartimentos moldados sob medida para guardar cada um dos seis módulos e a base do cinto de forma isolada, prevenindo danos aos componentes eletrônicos por atrito. Além de organizar, a caixa foi projetada para permitir a recarga do módulo principal através de uma porta USB-C externa, localizada na área posterior do estojo.

4.4. Design de Interação

A linguagem de interação do dispositivo vestível traduz as ações físicas do jogador em comandos virtuais por meio de duas modalidades, isto é, dinâmica corporal e acionamento tátil. A interação corporal capta o deslocamento do centro de massa do jogador em relação a um ponto de repouso (cf. R1). A partir desse centro, inclinações do tronco (i.e., para frente, para trás, e para os lados) são mapeadas como vetores de movimento. Nesse caso, o sistema atua persistindo o estado, e mantendo o comando direcional ativado enquanto o jogador sustenta a inclinação, interrompendo apenas quando o jogador retorna à sua postura de origem. Em relação à dinâmica de saltos e agachamentos, o sistema atua como gatilhos diretos de ação, mas sem persistência de estado.

Complementando a movimentação corporal, as quatro superfícies sensíveis ao toque (dos módulos de toque e híbridos) funcionam como uma interface de comandos (cf. R2). Embora a modularidade do cinto háptico permita que o jogador reposicione os módulos livremente, o layout descrito na Seção 4.2 carrega vantagens sob a ótica do design de interação, pois as áreas sensíveis ao toque ficam próximas dos braços do jogador, o que viabiliza uma interação tátil natural com esses sensores através, por exemplo, da palma da mão. Além do acionamento individual, a linguagem suporta toques

combinados, permitindo que o jogador não fique restrito a comandos predefinidos. Essa flexibilidade expande as possibilidades de entradas do jogador, que possui liberdade para combinar as áreas conforme necessário.

A Figura 3 apresenta exemplos da linguagem de interação do dispositivo vestível, demonstrando: o acionamento do módulo de toque-circular, localizado a NO, com dois dedos da mão esquerda (Figura 3a); o acionamento do módulo híbrido-estrela, localizado a L, com o cotovelo direito (Figura 3b); o acionamento combinado de ambos os módulos (Figura 3c); o acionamento combinado dos dois módulos (i.e., toque-circular e híbrido-triângulo) posicionados à esquerda do jogador (Figura 3d); o movimento de avanço do jogador, captado pela inclinação do tronco (Figura 3e).

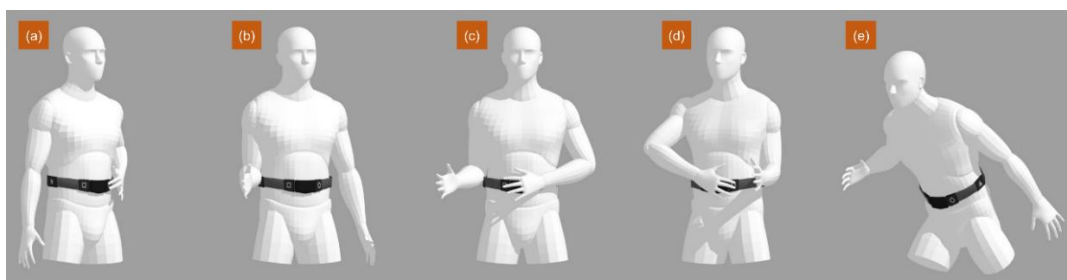


Figura 3. Exemplos de interação com o HaptFelt: acionamento tátil individual na região (a) frontal-esquerda e (b) lateral-direita; ativações combinadas em (c) e (d); e (e) demonstração de movimento de avanço.

4.5. Especificação Eletrônica

O projeto de hardware do dispositivo foi concebido visando produzir uma solução simples, de baixo custo, e que pudesse ser replicada por entusiastas da Cultura Maker. Assim, o “cérebro” da solução é um microcontrolador ESP32¹, unidade de processamento que possui dois núcleos, fundamental para processar os dados dos sensores em tempo real, e conectividade Bluetooth nativa (cf. R7). Em relação à captura de movimentos, foi utilizada a MPU-6050, que é uma unidade de medição inercial (IMU) que conta com um acelerômetro e um giroscópio, ambos de três eixos (cf. R1). O esquema eletrônico do dispositivo (Figura 4) detalha o sistema e todas as suas conexões. Cabe comentar que, na fase atual do projeto, a alimentação elétrica é fornecida via conexão USB, não sendo implementados circuitos de bateria ou gerenciamento de carga.

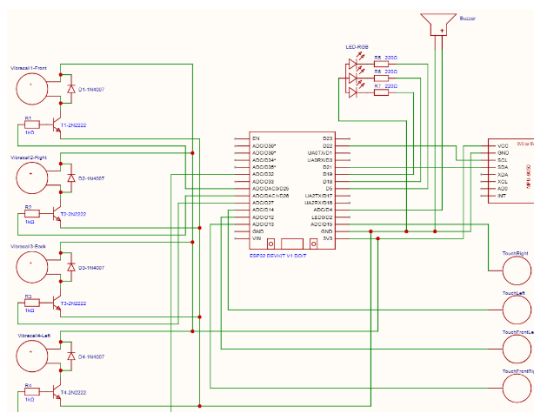


Figura 4. Esquema eletrônico do dispositivo.

¹ espressif.com/en/products/socs/esp32.

A “entrada tátil” (cf. R2) ocorre através de quatro áreas capacitivas, que foram construídas a partir de materiais baratos (p. ex., papel alumínio e fita adesiva). O retorno háptico (cf. R5) emprega quatro motores de vibração do tipo Eccentric Rotating Mass (ERM). Já as emissões luminosas e sonoras são produzidas, respectivamente, por meio de LED RGB (cf. R3) e *buzzer* (cf. R4). De forma geral, para compor o projeto ainda foram necessários a utilização de outros componentes eletrônicos, tais como, transistores (p. ex., 2N2222), diodos (p. ex., 1N4007) e resistores (p. ex., 1k Ω).

4.6. Arquitetura e Desenvolvimento de Software

A arquitetura de software da solução adota uma comunicação bidirecional assíncrona, projetada para minimizar a latência. O sistema opera baseado em eventos, distribuindo mensagens entre o dispositivo e o computador. Para otimizar a comunicação e reduzir a carga computacional, o dispositivo realiza o tratamento inicial dos dados, traduzindo os valores brutos em comandos codificados (p. ex., “movimento lateral” ou “toque na estrela”). No computador, a arquitetura prevê um serviço que atua como interpretador universal. Por meio de perfis de mapeamento customizáveis, este serviço converte os comandos codificados em eventos de entrada padrão (p. ex., botões de um teclado), permitindo que o jogador configure as associações entre comandos virtuais e ações físicas realizadas por meio do dispositivo. Simultaneamente, o canal inverso permite que as saídas do jogo sejam captadas e convertidas em instruções de *feedback* para o dispositivo, que ativa seus motores de vibração para simular respostas hápticas espaciais.

A Figura 5 apresenta o diagrama de componentes dos softwares da solução², que conta com dois componentes principais: (i) o *HaptFlelt Daemon*, executado no computador; e (ii) o *HaptFlelt Firmware*, embarcado no microcontrolador ESP32. O *firmware* foi desenvolvido em C++ e estruturado em dois componentes principais, representados por *Input/Output*, que reúne sensores e atuadores, e *Communication*. Todos esses elementos são controlados por um componente central (*core*), que se conecta através de interfaces predefinidas. Esta estrutura do *firmware* facilita a manutenção e manipulação isolada dos componentes individuais associados aos meios de entrada e saída, implementados, por exemplo, em *vibration*, *touch* e *movement*. Dado que, na maior parte dos jogos digitais, a latência ser um fator crítico, a arquitetura priorizou o processamento na borda, de modo que os dados brutos relativos ao movimento são processados internamente pelo microcontrolador, que interpreta o movimento executado e transmite via interface (*IHaptFlelt*) em forma de comando codificado para o computador. A comunicação utilizou o padrão Bluetooth Serial Port Protocol (SPP).

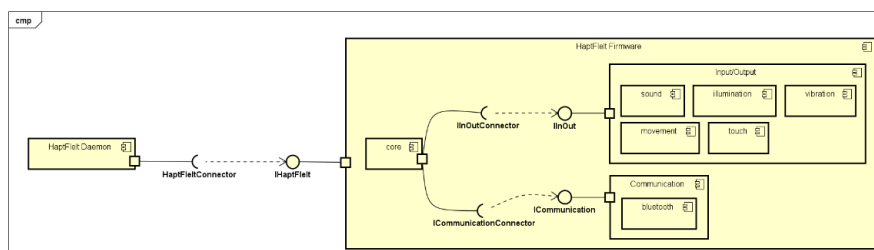


Figura 5. Diagrama de componentes dos softwares da solução.

² Softwares disponíveis no Repositório de Código-fonte do PAIRG/UFRN: github.com/pairg-ufrn/haptflelt.

4.7. Protótipo

O processo de construção do Cinto Háptico Flexível começou com a montagem inicial em protoboard dos circuitos eletrônicos do dispositivo (Figura 6a), conforme especificado na Seção 4.5. Após concretizada a prototipação eletrônica, o próximo passo foi realizar a soldagem dos componentes eletrônicos numa placa de fenolite ilhada (Figura 6b). Nesta placa de circuito impresso (PCI) perfurada foram soldados o ESP32, o MPU-6050, LED RGB, *buzzer*, transistores, diodos e resistores. Na etapa seguinte, o conjunto eletrônico foi integrado ao compartimento interno do módulo principal (Figura 6c).

A Figura 6e apresenta o protótipo do dispositivo vestível. A sua base estrutural utiliza uma fita elástica de 5cm de largura com um regulador de alça para ajustar o comprimento e um fecho de engate rápido. O protótipo conta com o módulo principal e os cinco módulos auxiliares, conformem descritos na Seção 4.2. Todos os módulos foram construídos com revestimento emborrachado de 4mm com o intuito de proporcionar conforme anatômico ao jogador. A fixação dos módulos no cinto é realizada através de fechos de contato, decisão que visou simplificar a montagem física do protótipo. A Figura 6f demonstra o dispositivo vestível no corpo do jogador. A Figura 6d ilustra a distinção visual entre os módulos que possuem ou não uma superfície sensível ao toque. Visualmente, módulos híbridos e de toque são iguais pelo fato do motor de vibração ser alocado na parte interna da estrutura emborrachada. Cabe comentar que, nesta versão do protótipo do dispositivo, os módulos não receberam os rótulos geométricos luminosos.

Após a montagem do protótipo, testes iniciais foram realizados conectando-se o dispositivo a um computador via o *HaptFlelt Daemon*. Para verificar a precisão de leitura, todos os comandos do cinto foram executados, sendo traduzidos e mapeados corretamente. O retorno háptico também foi validado, sendo corretamente acionado.



Figura 6. Evolução do protótipo do Cinto Háptico Flexível: (a) prototipação eletrônica em protoboard; (b) soldagem dos componentes numa PCI perfurada; (c) circuito interno do módulo principal; (d) dois tipos de módulos auxiliares; (e) protótipo do dispositivo vestível; e (f) dispositivo no corpo de um jogador.

5. Discussão

A concepção, a construção, e os testes do HaptFlelt demonstraram a viabilidade de um dispositivo vestível bidirecional de baixo custo. A escolha de componentes acessíveis alinha o projeto ao movimento “Faça Você Mesmo” (DIY, do inglês, Do It Yourself),

funcionando não apenas como um incentivo à democratização do acesso a interfaces hápticas avançadas, mas também como uma garantia de reprodutibilidade. Ao contrário de soluções comerciais de arquitetura fechada, o HaptFlelt permite que pesquisadores e desenvolvedores independentes apliquem, estendam e adaptem a tecnologia a diferentes contextos de uso e necessidades de pesquisa.

A arquitetura modular mostrou-se o pilar central do dispositivo, pois resolve desafios de ergonomia e higiene. A possibilidade de o jogador configurar o posicionamento dos módulos garante que a interface se adapte ao corpo do jogador, e não o contrário. No contexto de uso coletivo, a dinâmica de transferir apenas os módulos entre as bases elásticas de cada jogador resolve o problema da higienização sem comprometer os componentes eletrônicos. Seguindo uma visão prática, o dispositivo destaca-se por sua versatilidade, podendo atuar tanto como um controlador principal, quanto como um periférico complementar integrado a um *setup* existente. Além disso, a inclusão do estojo de armazenamento consolida o dispositivo como uma solução mais completa.

Como limitações deste trabalho, sinalizamos que o circuito para recarregar a bateria do módulo principal e os rótulos luminosos por LED dos módulos auxiliares não foram implementados, embora previstos no design do produto. Além disso, a conexão elétrica entre o módulo principal e os auxiliares foi realizada por meio de fios condutores convencionais. Essa abordagem foi adotada para garantir uma validação funcional dos sensores e atuadores, transferindo as trilhas maleáveis, bem como os sistemas que não foram implementados, para as próximas versões do dispositivo.

6. Conclusão

Este trabalho apresentou o processo de design e construção do Cinto Háptico Flexível, um dispositivo vestível bidirecional, modular, e que possui seus projetos de hardware e software abertos. Portanto, a principal contribuição deste trabalho reside no design e desenvolvimento deste novo artefato físico de interação. O dispositivo pode ser utilizado como “controle único” no contexto de jogos e RV, já que integra canais de entrada e saída com interação, predominantemente, baseada em “mãos-livres”. Alternativamente, este dispositivo também pode ser utilizado como um “controle complementar” aos joysticks tradicionais. A entrada ocorre através do movimento corporal e do tato em áreas sensíveis ao toque, enquanto a saída fornece retorno háptico ao redor do tronco do jogador. Este vestível possui características de design, conforme apresentado e discutido no artigo, que o diferencia dos demais cintos hápticos, trazendo inovação em controles para jogos.

Como trabalhos futuros, indicamos a realização de experimentos a fim de validar o HaptFlelt. Tais estudos visam avaliar a ergonomia e o conforto do cinto háptico em partidas de longa duração. Ainda, sugerimos testar com jogadores a sensibilidade (de entrada) dos módulos capacitivos, a precisão no mapeamento dos movimentos e, também, a adequação das respostas vibratórias na produção de uma boa experiência háptica.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo Grupo de Pesquisa em Artefatos Físicos de Interação (PAIRG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), e parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES processo #88887.003898/2024-00). Também agradecemos pelos recursos do Laboratório de Computação Física e Fisiológica do PAIRG (PAIRG L2PC) da UFRN.

Referências

- Arantes, F.L., Amiel, T., Miranda, L.C., Martins, M.C., & Baranauskas, M.C.C. (2012). Laptops educacionais em escolas públicas: Primeiros resultados de uma abordagem socio-técnica. *Revista Brasileira de Informática na Educação*, 20(2): 31-43.
- Bachmann, D., Weichert, F., & Rinkenauer, G. (2018). Review of three-dimensional human-computer interaction with focus on the leap motion controller. *Sensors*, 18(7): 2194.
- Bourachot, A., Bouchara, T., & Cornet, O. (2023). Impact of an audio-haptic strap to augment immersion in VR video gaming: a pilot study. In: *18th International Audio Mostly Conference*.
- Brandebusemeyer, C., Luther, A. R., König, S. U., König, P., & Kärcher, S. M. (2021). Impact of a vibrotactile belt on emotionally challenging everyday situations of the blind. *Sensors*, 21(21): 7384.
- Brizolara, P.L.S., Miranda, L.C., & Menezes, B.C. (2022). Esfera interativa: Design de um novo controle para jogos digitais. In: *XXI Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital (SBGames'22)*, 168-177.
- Brizolara, P.L.S., Miranda, L.C., Vasiljevic, G., & Menezes, B.C. (2023). The interactive sphere for three-dimensional control in games and virtual reality. *Journal on Interactive Systems*, 14(1): 448-469.
- DeVrio, N. & Harrison, C. (2025). Reel Feel: Rich Haptic XR Experiences Using an Active, Worn, Multi-String Device. In: *2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.
- Flores, G., Kurniawan, S., Manduchi, R., Martinson, E., Morales, L. M., & Sisbot, E. A. (2015). Vibrotactile guidance for wayfinding of blind walkers. *IEEE Transactions on Haptics*, 8(3): 306-317.
- Gopalai, A.A. & Senanayake, S.A.A. (2011). A wearable real-time intelligent posture corrective system using vibrotactile feedback. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 16(5): 827-834.
- Greinacher, R., Kojić, T., Meier, L., Parameshappa, R. G., Möller, S., & Voigt-Antons, J. N. (2020). Impact of tactile and visual feedback on breathing rhythm and user experience in VR exergaming. In: *12th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QOMEX'20)*.
- Katzschmann, R.K., Araki, B., & Rus, D. (2018). Safe local navigation for visually impaired users with a time-of-flight and haptic feedback device. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(3): 583-593.
- Kingma, H., Felipe, L., Gerards, M.C., Gerits, P., Guinand, N., Perez-Fornos, A., Demkin, V., & Van De Berg, R. (2019). Vibrotactile feedback improves balance and mobility in patients with severe bilateral vestibular loss. *Journal of neurology*, 266(Suppl 1): 19-26.
- Liu, K. (2000). *Semiotics in information systems engineering*. Cambridge University Press.

- Magalhães, G., Fonseca, D., Amorim, G., Viana, W., & Santos, J. (2025). Designing a Multimodal Feedback Component for VR Applications. In: *Brazilian Symposium on Multimedia and the Web (WebMedia'25)*.
- Miranda, L.C. & Baranauskas, M.C.C. (2009). Anéis interativos ajustáveis: Uma proposta de artefato físico de interação para a TVDI. In: *4th Latin American Conference on Human-Computer Interaction (CLIHC'09)*, 16-23.
- Miranda, L.C., Hornung, H.H., & Baranauskas, M.C.C. (2010). Adjustable interactive rings for iDTV. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 56(3): 1988-1996.
- Miranda, L.C., Hornung, H.H., & Baranauskas, M.C.C. (2011a). Adjustable interactive rings for iDTV: First results of an experiment with end-users. In: *2nd International Conference on Human Centered Design (HCD'11)*, 262-271.
- Miranda, L.C., Hornung, H.H., & Baranauskas, M.C.C. (2011b). Prospecting a new physical artifact of interaction for iDTV: Results of participatory practices. In: *1st International Conference on Design, User Experience, and Usability (DUXU'11)*, 167-176.
- Miranda, L.C., Hornung, H.H., & Baranauskas, M.C.C. (2011c). Qualitative results of an experiment with adjustable interactive rings for iDTV. In: *IADIS International Conference on Interfaces and Human Computer Interaction (IHCI'11)*, 233-240.
- Miranda, L.C., Hornung, H.H., Pereira, R., & Baranauskas, M.C.C. (2013). Exploring adjustable interactive rings in game playing: Preliminary results. In: *2nd International Conference on Design, User Experience and Usability (DUXU'13)*, 518-527.
- Miranda, L.C., Hornung, H.H., Solarte, D.S.M., Romani, R., Weinfurter, M.R., Neris, V.P.A., & Baranauskas, M.C.C. (2007). Laptops educacionais de baixo custo: Prospectos e desafios. In: *XVIII Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE'07)*, 280-289.
- Miranda, L.C., Piccolo, L.S.G., & Baranauskas, M.C.C. (2008). Artefatos físicos de interação com a TVDI: Desafios e diretrizes para o cenário brasileiro. In: *VIII Simpósio Brasileiro sobre Fatores Humanos em Sistemas Computacionais (IHC'08)*, 60-69.
- Murtinger, M., Uhl, J. C., Nguyen, Q., & Regal, G. (2023). Tangible tactical belt: Haptic realism for virtual reality police training. In: *IEEE International Conference on Metrology for eXtended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRINE'23)*.
- Pacchierotti, C., Sinclair, S., Solazzi, M., Frisoli, A., Hayward, V., & Prattichizzo, D. (2017). Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy, review, and perspectives. *IEEE Transactions on Haptics*, 10(4): 580-600.
- Park, S. U., Lee, H. K., Kim, H. B., Kim, D., Kim, W., Joo, J., ..., & Won, S. M. (2025). Wearable interactive full-body motion tracking and haptic feedback network systems with deep learning. *Nature communications*, 16(1): 8604.
- Pei, Siyou, Chen, A., Lee, J., & Zhang, Y. (2022). Hand interfaces: Using hands to imitate objects in AR/VR for expressive interactions. In: *2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.

- Preechayasomboon, P. & Rombokas, E. (2021). Haplets: Finger-worn wireless and low-encumbrance vibrotactile haptic feedback for virtual and augmented reality. *Frontiers in Virtual Reality*, 2: 738613.
- Santana, V.F., Solarte, D.S.M., Neris, V.P.A., Miranda, L.C., & Baranauskas, M.C.C. (2009). Redes sociais online: Desafios e possibilidades para o contexto brasileiro. In: *XXXVI Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH'09)*, 339-353.
- Stylianidis, A., Vermeulen, J., Houben, S., MacDonald, L., & Beale, R. (2017). Sensebelt: A belt-worn sensor to support cross-device interaction. In: *2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*.
- Tlili, F., Bouallegue, R., & Shubair, R. (2022). Design and architecture of smart belt for real time posture monitoring. *Internet of Things*, 17: 100472.
- Xu, J., Bao, T., Lee, U. H., Kinnaird, C., Carender, W., Huang, Y., Sienko, K. H., & Shull, P. B. (2017). Configurable, wearable sensing and vibrotactile feedback system for real-time postural balance and gait training: Proof-of-concept. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 14(1): 102.
- Yin, J., Hinchet, R., Shea, H., & Majidi, C. (2021). Wearable soft technologies for haptic sensing and feedback. *Advanced Functional Materials*, 31(39): 2007428.