

Investigando os Efeitos do *Feedback* Háptico em uma Experiência Musical Imersiva: Um Estudo com a PhysioDrum

Rômulo Vieira
Departamento de Computação
Aplicada
Universidade Federal de Lavras
(UFLA)
Lavras, Minas Gerais, Brasil
romulo.vieira@ufla.br

Débora C. Muchaluat-Saade
Laboratório Mídiacom
Universidade Federal Fluminense
(UFF)
Niterói, Rio de Janeiro, Brasil
debora@midia.com.uff.br

Pablo César
Centrum Wiskunde & Informatica
TU Delft
Amsterdã, Países Baixos
garcia@cw.nl

ABSTRACT

The use of haptic stimuli in musical practices has received increasing attention in the literature, particularly in applications related to expressiveness, aesthetic appreciation, and motor control. However, significant gaps still remain regarding the use and evaluation of haptic elements in immersive musical applications, as well as the lack of open-source, rapid-prototyping, and modular tools for experimentation in such environments. To address these limitations, this paper presents PhysioDrum, an immersive musical platform based on the phygital (physical + digital) paradigm, consisting of a virtual reality drum kit integrated with physical devices, responsive haptic feedback, and real-time sound processing. An experimental study was conducted with 30 participants divided into two groups: one exposed to uniform haptic feedback and the other to differentiated tactile patterns. The evaluation adopted a mixed-methods approach, combining standardized quantitative questionnaires and non-parametric statistical analyses. The results indicate that both haptic strategies positively contributed to the immersive experience, with uniform feedback favoring perceptual stability, immersion, and realism, while differentiated responses enhanced haptic realism, expressiveness, and multisensory harmony. As contributions, this work provides empirical evidence regarding the effects of vibrotactile feedback in immersive musical applications and proposes an open-source, modular, and rapid-prototyping platform for musical experimentation in immersive environments.

KEYWORDS

Feedback háptico, Realidade Virtual, Io3MT, Metaverso Musical, Bateria virtual

1 INTRODUÇÃO

A prática musical é uma atividade inerentemente multissensorial [14]. Para tocar um instrumento, o musicista deve executar um conjunto de gestos de controle complexos e refinados. Esses gestos são mediados por diferentes formas de *feedback* perceptual, incluindo estímulos auditivos, visuais, proprioceptivos e táteis [2].

O indicativo auditivo corresponde à emissão sonora decorrente de uma ação musical específica, como o som gerado ao pressionar e dedilhar uma corda. A resposta visual, por sua vez, manifesta-se em

fenômenos como a vibração das cordas de um violão, enquanto a retroalimentação proprioceptiva relaciona-se à percepção corporal e espacial do(a) intérprete, exemplificada pelo controle dos movimentos do arco por um violinista. Por fim, o *feedback* tátil refere-se às sensações físicas percebidas durante a execução musical, como as vibrações transmitidas por uma baqueta ao colidir com uma parte específica da bateria.

Essas diferentes modalidades de retorno sensorial compõem um ciclo perceptivo-motor fechado, no qual os musicistas realizam ações, percebem seus efeitos, avaliam os resultados e ajustam continuamente seus movimentos com base nas respostas recebidas. Esse comportamento ocorre de maneira rápida e iterativa ao longo da performance musical, sustentando uma relação dinâmica entre percepção sensorial e controle motor [38].

Sob a perspectiva do *feedback* tátil e háptico, observa-se que esses elementos auxiliam no desenvolvimento de habilidades musicais, contribuindo para a criação de aplicações mais intuitivas e fáceis de usar, além de colaborarem para a performance artística como um todo [10, 17].

Diante disso, há um crescente número de pesquisas que investigam o papel da informação tátil no enriquecimento da experiência musical [26, 28]. Essas investigações abrangem principalmente aplicações como o uso de estimulação vibrotátil para intensificar a apreciação estética em performances musicais [29], a influência de vibrações no comportamento motor em contextos de dança [30] e o aumento do engajamento musical e do desempenho em tarefas audiométricas por meio de estímulos hápticos [1].

Em paralelo a isso, uma nova área de pesquisa na computação musical surge com potencial para influenciar o desenvolvimento de novas aplicações e serviços: o Metaverso Musical (MM) [25]. Esse domínio representa o ramo do metaverso dedicado a viabilizar e aprimorar a criação, performance e interação musical. Embora trabalhos recentes [22, 27] tentem aproximar os elementos hápticos da área de MM, permanece um desafio traduzir esses parâmetros abstratos para contextos musicais [20, 21]. Ademais, tais ferramentas raramente suportam métodos de prototipagem rápida e não permitem o mapeamento direto e intuitivo do *feedback* vibrotátil às interações espaço-temporais dos usuários em ambientes imersivos [5].

Para preencher estas lacunas, o presente estudo apresenta a PhysioDrum [34], um sistema baseado nos fundamentos teóricos do Metaverso Musical e da Internet das Coisas Multissensoriais, Multimídia e Musicais (Io3MT) [31]. Essa plataforma apresenta um *kit* de bateria em realidade virtual (VR), permitindo interatividade por

meio de um instrumento musical inteligente (SMI) [24] chamado RemixDrum [33], juntamente com dois pedais físicos para habilitar o controle de ações na bateria por meio dos pés. Baseado no paradigma *phygital* (*physical + digital*), as ações físicas influenciam o ambiente virtual e vice-versa. Adicionalmente, o sistema permite o controle em tempo real de *patches* do Pure Data (Pd), manipulação visual dinâmica de artes gráficas criadas na linguagem Processing e *feedback* háptico responsivo, resultando em uma experiência musical interativa e multissensorial.

Para avaliar o impacto das informações hápticas na experiência do usuário (UX), foi conduzido um experimento estruturado com a participação de 30 voluntários, divididos em dois grupos experimentais: o grupo A recebeu um padrão vibrotátil uniforme para todos os elementos da bateria, enquanto o grupo B experimentou padrões hápticos distintos para cada componente do instrumento.

Ao término da sessão experimental, os participantes responderam a um conjunto de questionários quantitativos, com o objetivo de avaliar a influência da integração de estímulos vibrotáteis na qualidade da experiência (QoE). Posteriormente, foram aplicados métodos estatísticos para averiguar média, mediana, desvio-padrão e testes de Wilcoxon e Mann-Whitney para identificar diferenças perceptuais, comportamentais e de desempenho entre interações musicais com diferentes padrões vibrotáteis. Não foi objetivo deste trabalho investigar métricas técnicas, como tempo de resposta e acurácia de detecção.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados, destacando o estado da arte e as lacunas que esta pesquisa busca preencher. A Seção 3 descreve as diretrizes de desenvolvimento, a implementação da PhysioPiano e os métodos de avaliação da experiência do usuário. A Seção 4 detalha o cenário experimental, enquanto a Seção 5 discute os principais resultados e suas implicações. Por fim, a Seção 6 apresenta conclusões resumidas do estudo e as perspectivas de trabalhos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Este estudo se insere na convergência entre tecnologias táteis e performances musicais imersivas. Para contextualizá-lo, a revisão de literatura é organizada em duas frentes: investigações sobre o papel do *feedback* tátil em experiências artísticas e criativas e sistemas voltados à prática de *air drumming*.

2.1 Elementos Hápticos em Experiências Artísticas e Criativas

Evidências iniciais sugerem que dispositivos hápticos podem ampliar experiências artísticas e musicais [30]. Nesse contexto, trabalhos recentes investigam desde aplicações multimodais voltadas à intensificação da conexão emocional com obras artísticas [7] até o uso de vibrações instrumentais reproduzidas por dispositivos vestíveis para promover experiências musicais mais imersivas [11]. Estudos também exploram o potencial dessas tecnologias em contextos de saúde e acessibilidade, como melhorias em avaliações audiométricas por meio de estimulação vibrotátil [26] e enriquecimento da experiência musical de pessoas com deficiência auditiva [15].

Apesar desses avanços, ainda não há investigações sistemáticas sobre o impacto de elementos hápticos em performances musicais

imersivas fundamentadas nos princípios do Metaverso Musical e da Io3MT, especialmente no que se refere aos efeitos sobre a experiência do usuário. Esta pesquisa busca preencher essa lacuna.

2.2 Prática de Air Drumming

A prática de *air drumming* consiste na simulação de gestos percussivos sem o uso de instrumentos físicos. Nesse contexto, diversas abordagens computacionais têm sido propostas para converter esses movimentos em sons de bateria em tempo real, viabilizando interações musicais expressivas. Entre os exemplos mais relevantes destacam-se soluções comerciais como Aerodrums¹, Aeroband PocketDrum 2 Max² e Paradiddle³, que utilizam visão computacional, sensores de movimento, integração com protocolo *Musical Instrument Digital Interface* (MIDI) e recursos voltados à performance musical em ambientes imersivos.

Na pesquisa acadêmica, diversos sistemas também foram propostos, incluindo *Anywhere Anytime Drumming* (A2D) [37], *Augmented Virtual Drums* [39], *Virtual Musical Instruments* [18] e *Air Drums* [23], muitos deles fundamentados em técnicas de visão computacional e aprendizado profundo.

Apesar de suas vantagens, essas soluções ainda dependem de tecnologias proprietárias, oferecem baixa modularidade e pouco suporte à interação com os pés, além da escassez de estudos sobre *feedback* háptico e da limitada integração entre prototipagem rápida, multissensorialidade e experimentação em tempo real.

A proposta apresentada neste artigo busca superar essas limitações ao integrar de forma fluida elementos físicos e digitais, utilizando tecnologias acessíveis e de código aberto. Ela também inclui a simulação realista dos pedais de bateria, dois tipos distintos de *feedback* tátil, integração bidirecional em rede, suporte a interação *phygital*, processamento sonoro híbrido com síntese em tempo real, arquitetura modular e customizável, além da combinação simultânea de recursos hápticos, visuais e auditivos em um ambiente imersivo em realidade virtual. O sistema ainda se diferencia por contemplar aplicações voltadas não apenas ao entretenimento e à performance musical, mas também à pesquisa científica, educação musical e contextos terapêuticos.

3 METODOLOGIA DO ESTUDO

Esta seção apresenta os procedimentos metodológicos do estudo, incluindo uma descrição da PhysioDrum, plataforma musical multissensorial e imersiva utilizada como ferramenta experimental e fonte de coleta de dados, bem como os métodos empregados para a avaliação quantitativa da experiência dos usuários.

3.1 Implementação da PhysioDrum

A PhysioDrum [32, 34] foi implementada utilizando o Unity versão 2022.3.30, juntamente com o *headset* Meta Quest 3 e o Meta Interaction SDK versão 1.3.2. O ambiente virtual apresenta uma perspectiva em primeira pessoa de um *kit* de bateria, replicando seus elementos mais convencionais, como bumbo, caixa, surdo, dois tons, prato de condução e chimbal.

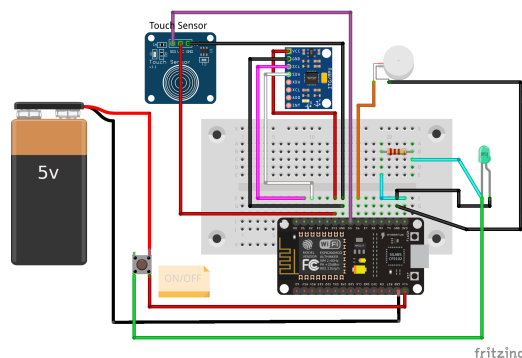
¹<https://aerodrums.com/>

²<https://www.aeroband.net/products/pocketdrum2-plus>

³<https://paradiddleapp.com/>

A interação com a bateria virtual é mediada por dois pedais físicos e pela RemixDrum [33], um dispositivo que incorpora sensores de toque e acelerômetros em baquetas tradicionais para controle de trilhas de áudio no Pure Data e realizarem mudanças na velocidade de movimento e padrões de cores nos elementos visuais renderizados em tempo real no Processing.

Na terceira versão da RemixDrum, criada especificamente para este estudo, esferas coloridas foram incorporadas ao equipamento. A posição dessas esferas é capturada e processada por um algoritmo de visão computacional implementado em Python 3.8, que traduz estes movimentos em comandos digitais, permitindo a interação em tempo real entre os ambientes físico e virtual. Ademais, um motor vibratório foi integrado ao circuito eletrônico do instrumento para fornecer *feedback* háptico, ampliando a percepção sensorial dos usuários durante colisões na bateria virtual. A Figura 1 apresenta tanto o circuito que viabiliza todas essas funcionalidades quanto a versão final do protótipo de alta fidelidade.



(a) Circuito eletrônico da PhysioDrum, integrando sensor de toque, acelerômetro e motor de vibração.

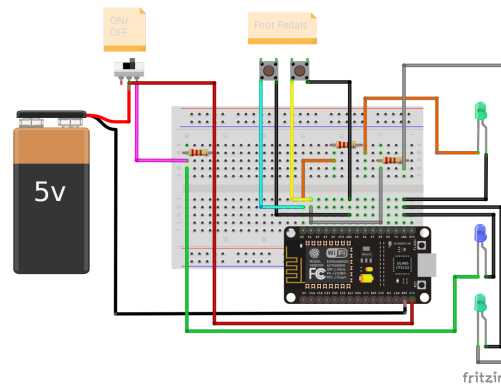


(b) Versão 3.0 da PhysioDrum, expandida para este estudo.

Figura 1: Dispositivos usados para interação com o ambiente musical imersivo.

Os pedais, por sua vez, são conectados a um circuito eletrônico capaz de detectar quando são acionados e enviar essa informação para a aplicação virtual por meio de mensagens *Open Sound Control* (OSC). Esses dispositivos foram projetados para imitar a funcionalidade dos pedais de baterias tradicionais, acionando os sons do

bumbo e do chimbal no ambiente virtual. A Figura 2 ilustra o circuito que habilita a integração dos pedais com a aplicação virtual e a montagem final dos pedais.



(a) Circuito eletrônico para detecção dos comandos enviados pelos pedais.



(b) Case com pedais físicos usados na interação com a PhysioPiano.

Figura 2: Sistema de pedais desenvolvido para o ambiente PhysioPiano.

Este modo operacional utiliza movimentos físicos para controlar e ativar elementos no mundo digital, fundamentando-se no conceito de *phygital* [13]. Como o termo sugere, essa abordagem mescla processos físicos e digitais, criando conexões e redes que ligam esses dois domínios para permitir novas funcionalidades e formas de interação. Consequentemente, o sistema oferece uma experiência de interação fluida e intuitiva, conectando ações físicas às suas correspondentes respostas virtuais. A Figura 3 ilustra as interações e trocas de informação na PhysioDrum⁴.

⁴Código-fonte: <https://github.com/romulovieira-me/PhysioDrum>.

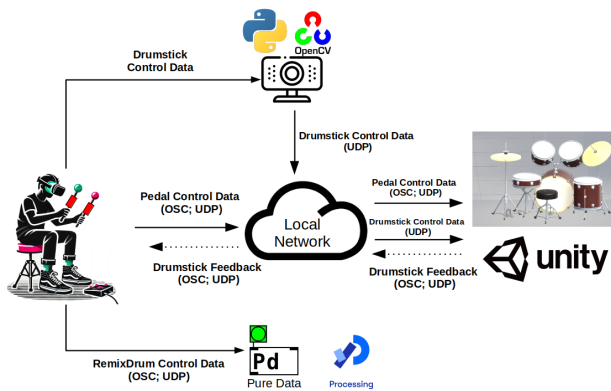


Figura 3: Arquitetura funcional da PhysioDrum.

3.2 Protocolo para Aferição da Experiência do Usuário

Para avaliar a experiência dos participantes com a PhysioDrum, foi adotado um protocolo baseado na interação usuário-sistema, com ênfase em usabilidade, imersão, presença e qualidade do *feedback* tátil. A abordagem visa compreender como esses fatores afetam a experiência em ambientes musicais imersivos, orientando melhorias no *design* e na integração de elementos hápticos.

Foram utilizados instrumentos quantitativos padronizados, amplamente empregados em pesquisas com realidade virtual a saber:

- **Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)**: avalia sintomas fisiológicos relacionados à exposição a ambientes imersivos, permitindo identificar desconfortos associados ao uso do mesmo [9];
- **Presence Questionnaire (PQ)**: mensura a percepção de presença com base em quatro dimensões: Envolvimento, Imersão/Adaptação, Fidelidade Sensorial e Qualidade da Interface [36];
- **System Usability Scale (SUS)**: avalia a usabilidade percebida da aplicação, considerando fatores como complexidade, necessidade de suporte técnico e facilidade de uso [3];
- **Questionário Háptico (HQ)**: composto por 22 itens distribuídos em cinco dimensões: Harmonia (coerência e integração do *feedback* háptico com a experiência), Expressividade (capacidade de apresentar variações e transmitir nuances), Autotelia (caráter intrinsecamente agradável e satisfatório do *feedback*), Imersão (grau de envolvimento, concentração e interação do usuário com o ambiente) e Realismo (credibilidade e correspondência do *feedback* com sensações esperadas no mundo real), avaliando especificamente a qualidade das informações táteis [19].

Embora a aplicação de múltiplos instrumentos possa aumentar a carga sobre os participantes, neste estudo buscou-se limitar esse impacto por meio da seleção de questionários consolidados e diretamente relacionados aos aspectos investigados. Além disso, os instrumentos foram aplicados de forma estruturada ao longo do protocolo experimental, buscando reduzir possíveis efeitos de fadiga e desmotivação durante a avaliação.

4 ESTRUTURA DO ESTUDO EXPERIMENTAL

Experimentos em laboratório foram conduzidos na PhysioDrum entre os dias 5 e 27 de maio de 2025, envolvendo 30 participantes distribuídos aleatoriamente, em números iguais, em dois grupos distintos. O Grupo A recebeu *feedback* háptico uniforme, ao passo que o Grupo B experimentou respostas distintas para os diferentes elementos da bateria. O estudo adotou um delineamento experimental baseado na análise entre sujeitos, comparando os tipos de *feedback* háptico recebido.

Dada a ausência de um mapeamento padronizado entre instrumentos musicais virtuais e suas respostas hápticas associadas, as configurações de *feedback* adotadas neste estudo foram definidas empiricamente pelos autores, estabelecendo relações entre o comportamento real desses componentes e os possíveis retornos hápticos que eles podem realizar. Ainda, a ordem de apresentação dessas condições foi randomizada com o objetivo de reduzir vieses sistemáticos.

Cabe destacar que a definição de 30 participantes está alinhada a estudos exploratórios em Interação Humano-Computador (IHC), Realidade Virtual e experiências imersivas, nos quais amostras entre 12 e 30 participantes são frequentemente consideradas adequadas para identificar tendências de uso e diferenças perceptivas iniciais [16]. Além disso, estudos clássicos de usabilidade [6, 35] indicam que amostras nessa faixa permitem resultados estatisticamente interpretáveis, especialmente em análises não paramétricas. Dessa forma, a amostra adotada mostrou-se adequada ao caráter exploratório desta pesquisa.

A faixa etária dos participantes variou de 18 a 54 anos (média = 26,67; desvio-padrão = 10,23), com amostra composta por 24 homens e 6 mulheres. O grupo apresentou diversidade em termos de formação acadêmica, com concentrações nas áreas de ciência da computação, engenharia e psicologia.

O procedimento de teste foi estruturado em três fases sequenciais. A fase inicial consistiu em uma sessão de exploração livre, na qual cada participante teve três minutos para interagir espontaneamente com a PhysioDrum, com objetivo de promover a familiarização com o sistema. Não foram feitas análises para verificar o grau de aprendizado após esta primeira etapa. Na segunda fase, os participantes executaram quatro tarefas musicais, exibidas na Figura 4. Elas eram baseadas no modelo “Follow Me”, onde uma demonstração era exibida ao usuários e eles deveriam replicar os movimentos. Tais ações seguiram respectivamente quatro diferentes andamentos musicais: *largo* (40 BPM), *adagio* (66 BPM), *andante* (76 BPM) e *moderato* (108 BPM). Os padrões rítmicos associados a cada andamento foram projetados para serem acessíveis a iniciantes, embora introduzissem um aumento gradual na complexidade.

A terceira fase espelhou a anterior, com a repetição das mesmas tarefas, sendo a diferença o fato de os participantes receberem ou não *feedback*, a depender de como foi elaborada a segunda fase. Cada sessão completa teve duração média de aproximadamente 15 minutos. Ao final da atividade, os participantes foram convidados a responder aos questionários na seguinte ordem: SSQ, PQ, SUS e HQ, de modo a avaliarem suas percepções sobre a experiência no ambiente imersivo. Buscou-se, ainda, identificar diferenças perceptuais, comportamentais e de desempenho entre interações musicais que



Figura 4: Tarefas executadas na avaliação da PhysioDrum.

utilizam padrões vibrotáteis uniformes e aquelas que apresentam a mesma informação de forma variável.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação do Impacto do Ambiente Imersivo

O SSQ foi administrado antes e depois dos testes práticos, visando comparar o estado físico habitual dos participantes com possíveis alterações provocadas pela exposição ao ambiente imersivo, como mostra a Figura⁵ 5.

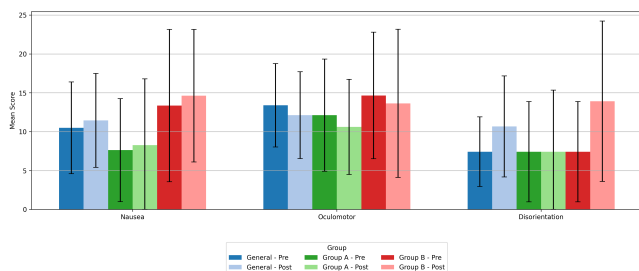


Figura 5: Comparação dos resultados do *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) antes e após a experiência imersiva.

De modo geral, os resultados permaneceram dentro de uma faixa considerada segura, sem indicação de sintomas fisiológicos severos. Ainda assim, observam-se diferenças importantes entre os grupos, especialmente nas subescalas de Náusea e Desorientação. Na análise

⁵Todas as figuras são apresentadas em formato reduzido para economizar espaço. Recomenda-se o uso de *zoom* no leitor de PDF para correta apreciação da imagem, conforme tem se tornado praxe em artigos científicos.

geral dos dados pré-experimentais, nota-se assimetria nas distribuições, com discrepâncias relevantes entre média e mediana e altos desvios-padrão, indicando a presença de anomalias. A subescala de Náusea apresentou média de 10,49 e desvio-padrão de 16,50. Isso sugere que a maioria dos participantes reportou sintomas leves, mas alguns casos extremos influenciaram a média. Já a Desorientação teve média de 7,42 e mediana de 0,00, o que reforça a ocorrência de sintomas mais acentuados em apenas uma minoria dos participantes. O resultado médio foi de 117,10, sinalizando a presença de sintomas fisiológicos moderados antes da experiência, possivelmente causados por fatores extrínsecos como deslocamentos, realização prévia de tarefas com demanda física e/ou mental ou fadiga.

Após a interação com a PhysioDrum, a pontuação média geral apresentou uma elevação discreta, passando de 117,10 para 128,09. No entanto, essa variação deve ser interpretada com cautela. Embora a média tenha aumentado, a mediana (46,19) indica que a maioria dos participantes manteve indicadores baixos, com a elevação influenciada por poucos casos isolados. Especificamente, a subescala de Desorientação foi a que mais contribuiu para esse aumento (média passou de 7,42 para 10,67), mas a mediana continuou sendo 0,00, sugerindo que os sintomas se concentraram em poucos indivíduos. As dimensões de Náusea e Oculomotor oscilaram de forma discreta.

No Grupo A, os resultados pós-experimento mostram que os sintomas oculomotores diminuíram (de 12,13 para 10,61), enquanto a Náusea e a Desorientação permaneceram em níveis baixos. Esses resultados sugerem que a experiência com *feedback* tátil uniforme foi confortável e não intensificou os sintomas fisiológicos. A natureza rítmica e previsível das respostas sensoriais podem ter favorecido a adaptação ao sistema, minimizando reações adversas.

Para verificar estatisticamente essa variação, foi aplicado o teste de Wilcoxon [4], um teste não paramétrico utilizado para comparar duas medições pareadas. Os resultados não indicaram diferenças estatisticamente significativas entre as sessões de um mesmo participante, sugerindo que a experiência imersiva com a PhysioDrum não provocou alterações relevantes nos sintomas autorrelatados de enjoo de simulação.

Na categoria Náusea, o valor de $W = 9$ com $p = 0,3795$ indica que os relatos de desconforto gastrointestinal permaneceram relativamente estáveis entre as duas sessões. Para o elemento Oculomotor também não houve variação significativa ($W = 20,5$; $p = 0,4694$). No componente Desorientação, o resultado foi ainda mais consistente com a estabilidade dos sintomas ($W = 4$; $p = 0,7055$). A maioria dos participantes não apresentou mudanças relevantes entre pré e pós, e os poucos casos com variações individuais positivas ou negativas foram compensados pela estabilidade do grupo como um todo.

Ao considerar o resultado total do SSQ para o Grupo A, o teste de Wilcoxon também indicou ausência de diferença significativa entre as sessões ($W = 45$, $p = 0,9720$). Os valores médios permaneceram praticamente inalterados, com pequena oscilação individual compensada na média geral. Desse modo, as classificações médias se enquadram na faixa de leve intensidade, indicando que, mesmo com a exposição a um ambiente virtual interativo e sensorialmente denso, os participantes desse conjunto não desenvolveram sintomas significativos de enjoo cibernético.

A análise das pontuações no Grupo B também não revelou diferenças entre as condições pré e pós-experimento em nenhuma das três subescalas avaliadas. Os testes de Wilcoxon mostraram valores de $W = 6$ ($p = 0,3441$) para Náusea, $W = 10$ ($p = 0,9163$) para Oculomotor e $W = 0$ ($p = 0,1025$) para Desorientação, indicando que, sob o ponto de vista estatístico, os sintomas relacionados ao enjoo cibernético se mantiveram estáveis após a exposição ao sistema.

Para verificar as diferenças estatísticas entre os grupos, foi conduzido o teste de Mann-Whitney [12], que a exemplo do teste de Wilcoxon, compara populações não paramétricas, mas independentes. Os resultados indicaram que não houve diferenças estatisticamente significativas nas subescalas de náusea ($U = 73,50$; $p = 0,081$), esforço oculomotor ($U = 104$; $p = 0,728$) e desorientação ($U = 89,00$; $p = 0,268$).

Tomando como base também os valores médios de cada subescala, é possível destacar uma maior variabilidade individual no Grupo B, mas ainda assim, o sistema permanece tolerável do ponto de vista fisiológico para a maioria dos usuários desse substrato.

Na comparação entre os momentos pré e pós-experimento, foi possível notar um leve aumento dos *scores* finais, principalmente na dimensão Desorientação. Entretanto, as medianas permaneceram baixas e os testes estatísticos de Wilcoxon não identificaram diferenças significativas entre os dois momentos para nenhuma das subescalas ou para o resultado total. Esses resultados indicam que a utilização da PhysioDrum não provocou aumento coletivo significativo de sintomas, demonstrando estabilidade fisiológica durante a experiência imersiva. Além disso, os sintomas observados concentraram-se em poucos participantes específicos, enquanto a maioria manteve pontuações próximas de zero ao longo de toda a sessão experimental.

5.2 Avaliação da Presença na PhysioDrum

A Figura 6 sintetiza a análise de cada subdimensão do PQ, assim como a nota total. É apresentado ainda o valor de cada média e seu respectivo desvio-padrão.

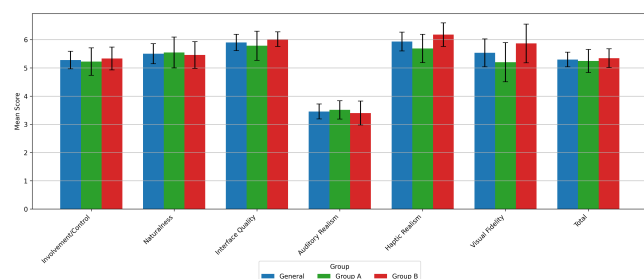


Figura 6: Resultados do questionário PQ, responsável por aferir a imersão percebida no sistema.

Os resultados indicam que ambos os grupos apresentaram médias totais compatíveis com o nível de “alta presença percebida”, conforme as classificações usuais da escala PQ: Grupo A: $M = 5,25$ ($DP = 0,96$) e Grupo B: $M = 5,34$ ($DP = 0,66$). Apesar da proximidade entre os índices gerais, a análise por subescala revela diferenças

qualitativas significativas na forma como cada grupo experienciou a imersão na PhysioDrum.

O Grupo B obteve as maiores médias em Realismo Háptico ($M = 6,18$), Qualidade da Interface ($M = 6,02$) e Fidelidade Visual ($M = 5,87$). Esses resultados sugerem que a variabilidade háptica contribuiu positivamente para a percepção de realismo, expressividade sensorial e coerência entre ação e resposta do sistema. A presença de estímulos táteis diferenciados pode ter reforçado elementos críticos para a presença, como o senso de agência, o engajamento motor e a responsividade do ambiente, componentes essenciais para experiências imersivas eficazes.

O Grupo A também apresentou resultados elevados, com destaque para as dimensões Naturalidade ($M = 5,54$) e Envolvimento e Controle ($M = 5,22$). Tais resultados indicam que a consistência e previsibilidade do *feedback* tátil favoreceram a familiarização com o ambiente e a construção de uma sensação de domínio sobre a interação, mesmo diante de uma menor diversidade sensorial.

Esses achados sugerem que, em determinadas condições, a estabilidade sensorio-motora pode contribuir positivamente para a concentração e imersão em uma atividade, assim como auxiliar a percepção de controle contínuo sobre a experiência virtual.

Em ambos os grupos, a dimensão Realismo Auditivo foi consistentemente a menos bem avaliada (Grupo A: $M = 3,51$; Grupo B: $M = 3,40$), evidenciando uma limitação na integração do canal auditivo à experiência multissensorial. Essa percepção pode estar relacionada a um estranhamento das técnicas de espacialização sonora fornecidas pelo próprio óculos VR, ou ainda a incongruências perceptivas, como o comportamento estático do chimbau, que permanecia na posição “aberta” independentemente da ação realizada pelo usuário.

Embora a análise estatística não tenha revelado diferenças significativas entre os Grupos A e B em nenhuma das subescalas avaliadas, os resultados reforçam a hipótese de que a resposta háptica é um componente central na construção da presença em ambientes musicais virtuais. A manipulação das características táteis demonstrou impacto direto não apenas na percepção sensorial (ex: realismo tátil), mas também em dimensões cognitivas e afetivas da presença, como o controle percebido, a fluidez da interação e o realismo global do ambiente.

Sob a perspectiva do *design* de experiências imersivas, os achados apontam para duas estratégias complementares e igualmente válidas: i) a consistência do *feedback* tátil, como observado no Grupo A, pode favorecer experiências mais estáveis, previsíveis e propensas à indução de imersão; ii) a variabilidade sensorial, como no Grupo B, tende a promover uma experiência mais dinâmica, envolvente e realista, intensificando o impacto perceptivo da interação.

A escolha entre essas abordagens pode ser estrategicamente orientada conforme os objetivos da aplicação, por exemplo, ambientes performáticos e artísticos podem se beneficiar da variabilidade tátil, enquanto aplicações terapêuticas ou educativas podem favorecer estímulos mais estáveis e controlados.

5.3 Usabilidade da Plataforma PhysioDrum

O SUS foi aplicado imediatamente após a interação dos participantes com a aplicação e antes de qualquer *debriefing*. A Tabela 1

exibe esta avaliação para os grupos analisados, levando em consideração a metodologia de análise proposta por Grier et al. [8], que, baseando-se no índice SUS, estabelece novas formas de classificar o sistema, valendo-se de notas, comparação com outras aplicações que utilizaram este método avaliação, atribuição de adjetivos e análise da aceitabilidade do sistema junto do *Net Promoter Score* (NPS). Os resultados demonstram uma avaliação globalmente positiva da usabilidade da PhysioDrum. As médias elevadas e os baixos desvios-padrão entre os grupos sugerem uma experiência estável, eficaz e acessível para diferentes perfis de usuários. A alta proporção de participantes classificados como Promotores reforça essa percepção, indicando elevado potencial de recomendação do sistema.

Realizando a análise questão por questão do SUS (Tabela 2), nota-se que para Q1 (Eu acho que gostaria de usar a PhysioDrum frequentemente), a mediana foi 4 para ambos os grupos, o que revela uma intenção de uso continuado e consistente. Já na segunda questão (Eu achei a PhysioDrum desnecessariamente complexa), a mesma resposta foi majoritária em ambos os grupos, resultando em mediana 1. Isso indica que a manipulação experimental não afetou a simplicidade percebida do sistema.

As avaliações em Q3 (Eu achei a PhysioDrum fácil de usar) e Q5 (Eu achei que as várias funções da PhysioDrum foram bem integradas) mantiveram padrões equivalentes entre os grupos, com medianas iguais a 4 e predomínio das respostas positivas. Esses resultados confirmam a consistência da percepção de usabilidade básica entre os dois perfis de experiência tátil.

Entretanto, diferenças mais significativas emergiram em três itens específicos. Na questão Q4 (Eu achei que precisaria de ajuda de uma pessoa técnica para ser capaz de usar a PhysioDrum), que avaliava a percepção de necessidade de suporte técnico, o Grupo A apresentou mediana igual a 1, enquanto o Grupo B indicou mediana igual a 2. Apesar de ambos os grupos tenderem a discordar da afirmação, o deslocamento na mediana do Grupo B sugere uma leve insegurança adicional no uso autônomo do sistema. Essa tendência se repete na questão Q6 (Eu acho que a PhysioDrum apresenta muita inconsistência), onde o Grupo A novamente apresentou mediana inferior (2,0) em relação ao Grupo B (3,0). A maior dispersão de respostas nesse item, especialmente no Grupo B, pode refletir uma percepção subjetiva de imprevisibilidade introduzida pelos estímulos táteis variados.

A questão Q8 (Eu achei a PhysioDrum muito complicada de usar) também revelou distinções. O Grupo A apresentou mediana igual a 1, enquanto o Grupo B teve mediana 2, indicando uma leve redução na autoconfiança dos usuários quando submetidos à condição experimental com maior complexidade sensorial. Essa diferença, embora sutil, pode indicar que o uso de *feedback* não uniforme exige maior adaptação perceptiva ou cognitiva por parte dos usuários.

As questões restantes não apresentaram diferenças entre os grupos. Todos os participantes avaliaram positivamente a Q7 (Eu imagino que a maioria das pessoas pode aprender a usar a PhysioDrum rapidamente), Q9 (Eu me senti seguro(a) usando a PhysioDrum) e Q10 (Eu precisei aprender muitas coisas antes que pudesse utilizar a PhysioDrum). Esses resultados reforçam a robustez do sistema em termos de curva de aprendizado e clareza estrutural, independentemente das variações experimentais no *feedback* tátil.

O teste de Mann-Whitney confirmou a ausência de diferenças significativas entre os grupos em todas as questões do SUS. Isso indica que, além de estatisticamente não significativas, as diferenças observadas também apresentaram baixa magnitude prática. Ainda assim, os maiores valores de efeito ocorreram justamente em aspectos relacionados à facilidade de uso, integração funcional e facilidade de aprendizado, sugerindo uma tendência levemente mais favorável ao Grupo B.

Como um todo, a PhysioDrum foi avaliada como amplamente usável, com alta consistência nas respostas e uma estrutura perceptiva coerente com modelos clássicos de usabilidade, indicando que ela atende a princípios fundamentais, como consistência, facilidade de uso e confiança na operação.

5.4 Avaliação Háptica da PhysioDrum

Os resultados gerais do questionário háptico e de cada uma de suas seções são sumarizados na Figura 7.

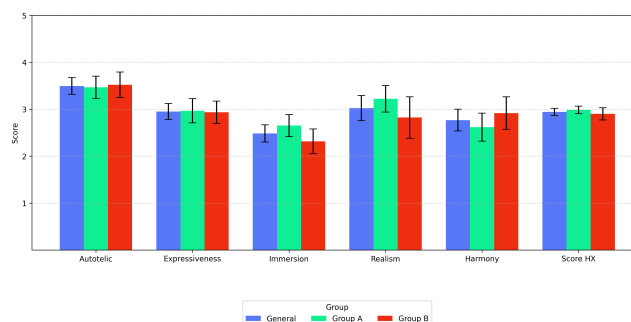


Figura 7: Avaliação geral do questionário háptico.

No aspecto Autotético, os dois grupos apresentaram valores praticamente idênticos. A mediana foi de 3,4 para ambos, e as médias foram muito próximas (3,47 no Grupo A e 3,52 no Grupo B), com desvios-padrão também similares. O teste de Mann-Whitney não indicou diferença estatisticamente significativa ($U = 106$; $p = 0,801$). Esses resultados sugerem que a natureza do *feedback* tátil não influenciou substancialmente a percepção de fluidez, prazer ou engajamento intrínseco com a tarefa.

A subescala Expressividade também revelou padrões bastante semelhantes entre os grupos. Ambos apresentaram mediana de 3,0, com médias similares (2,97 no Grupo A e 2,93 no Grupo B). O teste de Mann-Whitney reforçou a ausência de diferença significativa entre as condições ($U = 112,5$; $p = 1,00$). Embora esse valor de p seja incomum, ele é consistente com a elevada sobreposição observada entre as distribuições das respostas dos dois grupos, não fornecendo qualquer evidência estatística de diferença entre as condições avaliadas. Ressalta-se, contudo, que esse resultado não implica equivalência absoluta entre os grupos, mas apenas que, para a escala analisada, o teste não identificou diferenças em suas distribuições.

A análise do parâmetro Imersão foi a que trouxe indícios mais marcantes de diferenciação entre os grupos. Apesar de a mediana ter se mantido em 2,5 para ambos, a média do Grupo A foi superior

Tabela 1: Análise da nota SUS para cada grupo.

Grupo	Índice SUS	Desvio-padrão	Nota	Percentil	Adjetivo	Aceitabilidade / NPS
Geral	85,0	9,44	A	~95-98	Excelente	Aceitável / Promotor
A - <i>feedback</i> háptico uniforme	84,5	9,12	A-	~70-90	Excelente	Aceitável / Promotor
B - <i>feedback</i> háptico diferente	85,5	10,36	A	~95-98	Excelente	Aceitável / Promotor

Tabela 2: Resultados de cada questão do questionário SUS para os grupos A e B, indicando a mediana e o desvio padrão entre parênteses.

Questão	Grupo A	Grupo B
Q1	4,0 (1,014)	4,0 (0,884)
Q2	1,0 (0,910)	1,0 (0,594)
Q3	4,0 (0,941)	4,0 (0,799)
Q4	1,0 (0,915)	2,0 (0,816)
Q5	4,0 (0,799)	4,0 (0,632)
Q6	2,0 (1,335)	3,0 (0,961)
Q7	5,0 (0,507)	5,0 (0,816)
Q8	1,0 (0,617)	2,0 (0,561)
Q9	5,0 (0,561)	5,0 (1,056)
Q10	1,0 (0,352)	1,0 (0,258)

(2,65) em comparação ao Grupo B (2,32), acompanhada de menor desvio-padrão (0,46 contra 0,52). Embora a diferença não tenha alcançado significância estatística ($U = 153$; $p = 0,0879$), os dados sugerem uma tendência relevante: o *feedback* uniforme parece ter proporcionado uma experiência mais envolvente, potencialmente por promover uma sensação de continuidade e previsibilidade na interação.

A subescala Realismo também favoreceu o Grupo A. A mediana foi de 3,33, e a média de 3,22, em contraste com valores mais baixos no Grupo B (mediana de 3,00; média de 2,82). O desvio-padrão foi menor no Grupo A (0,56 contra 0,87), apontando para maior homogeneidade nas percepções de realismo. Apesar disso, o teste de Mann-Whitney não indicou significância estatística ($U = 142$; $p = 0,2186$). A maior dispersão no Grupo B pode ser interpretada como resultado de experiências táteis mais heterogêneas, possivelmente dificultando a interpretação sensorial ou gerando inconsistência na resposta perceptiva, o que impacta negativamente a sensação de realismo.

Na dimensão Harmonia, observou-se um padrão invertido. O Grupo B obteve média superior (2,92) e mediana de 2,75, em comparação com o Grupo A (média de 2,62; mediana de 2,5). O teste de Mann-Whitney, no entanto, não detectou diferença significativa ($U = 83,5$; $p = 0,2313$). Apesar disso, os dados sugerem que o *feedback* tátil diferenciado pode ter reforçado o mapeamento entre estímulos sensoriais e as ações motoras, promovendo uma percepção mais integrada dos diversos elementos da experiência multimodal. Essa interpretação é plausível, especialmente em contextos em que a diferenciação tátil atua como canal informativo adicional, facilitando a distinção entre partes da bateria virtual.

Por fim, o índice total do questionário, que resume a experiência háptica global, apresentou média ligeiramente superior no

Grupo A (2,98) em comparação ao Grupo B (2,90), além de menor desvio-padrão (0,16 vs. 0,26), indicando uma distribuição de respostas mais concentrada e homogênea. O teste de Mann-Whitney confirmou a ausência de diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($U = 132$; $p = 0,4301$).

Como um todo, ambos os grupos avaliaram positivamente a experiência háptica, sem diferenças estatisticamente significativas entre as condições. As principais diferenças ocorreram em Imersão, Realismo e Harmonia, com o Grupo A apresentando médias superiores nas duas primeiras dimensões, sugerindo que a previsibilidade do *feedback* uniforme favoreceu uma experiência mais estável e coerente.

6 CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um ambiente musical imersivo fundamentado nos princípios do Metaverso Musical e da Internet das Coisas Multissensoriais, Multimídia e Musicais (Io3MT), com o objetivo de investigar os impactos do *feedback* háptico por meio de métodos mistos, combinando análises estatísticas e questionários quantitativos.

O Grupo A apresentou menor impacto fisiológico, além de maiores índices de naturalidade, imersão e realismo. Em contraste, o Grupo B obteve melhor desempenho em usabilidade, envolvimento, controle e harmonia multissensorial. Tais resultados sugerem que diferentes estratégias hápticas influenciam de maneira distinta a experiência imersiva, indicando que respostas táteis variadas podem beneficiar aplicações performáticas e artísticas, enquanto estímulos uniformes tendem a favorecer contextos onde a previsibilidade é esperada.

As contribuições deste trabalho perpassam a apresentação de evidências empíricas sobre os efeitos do *feedback* vibrotátil na experiência do usuário em ambientes musicais imersivos, especialmente em aspectos relacionados à imersão, presença percebida e usabilidade. Além disso, propõe um ambiente de código aberto, modular e de rápida prototipação, voltado à experimentação de interações táteis com instrumentos musicais virtuais. O artigo também introduz e aplica o conceito de *phygital* no contexto do Metaverso Musical combinado com Io3MT, promovendo integração em tempo real entre os domínios físico e virtual e ampliando as possibilidades de *design* de sistemas musicais multissensoriais e interativos.

No entanto, algumas limitações foram identificadas. Embora adequada ao caráter exploratório do estudo, a amostra de 30 participantes pode ter reduzido a capacidade de detectar diferenças sutis entre as condições experimentais. Ainda neste sentido, o baixo número de participantes com experiência em música e/ou prática de bateria pode ter influenciado a execução das tarefas, especialmente aquelas envolvendo diferentes andamentos musicais, uma vez que

a breve etapa de exploração livre pode não ter sido suficiente para compensar diferenças prévias de familiaridade e habilidade musical.

Como trabalhos futuros, pretende-se aprimorar aspectos funcionais da plataforma, incluindo melhorias visuais, personalização de tarefas, gravação de sessões e ajustes relacionados ao áudio e ao comportamento do chimbau. Também é objetivo ampliar o estudo por meio da replicação do experimento com uma amostra mais ampla e diversificada de participantes.

CONSIDERAÇÕES ÉTICAS

O estudo foi realizado no âmbito do Projeto SenseGames e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) da Universidade Federal Fluminense, sob o CAAE 88638025.0.0000.8160. Todos os participantes foram previamente informados sobre os objetivos e procedimentos do estudo e participaram voluntariamente mediante assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), podendo interromper sua participação a qualquer momento.

Os dados coletados foram tratados de forma confidencial e utilizados exclusivamente para fins de pesquisa. As respostas aos questionários foram armazenadas e analisadas de forma anonimizada, sem a divulgação de informações que permitissem a identificação individual dos participantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio das seguintes agências de fomento: CAPES, CAPES Print, RNP, CNPq, FINEP, FAPERJ e INCT-ICONIoT.

Não foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial (IA), incluindo IA generativa, na elaboração deste artigo. A análise dos dados foi realizada pelos autores utilizando o ambiente Jupyter Notebook. A escrita, interpretação dos resultados e revisão do manuscrito foram integralmente realizadas pelos autores.

REFERÊNCIAS

- [1] Alfonso Balandra, Hironori Mitake, Takako Yoshida, and Shoichi Hasegawa. 2019. Selective listening attention enhancement, using a simultaneous visual and haptic stimuli. *Journal of New Music Research* 48, 3 (2019), 294–308.
- [2] Alexandre Bouënard, Marcelo MM Wanderley, and Sylvie Gibet. 2010. Gesture control of sound synthesis: Analysis and classification of percussion gestures. *Acta Acustica united with Acustica* 96, 4 (2010), 668–677.
- [3] John Brooke. 2013. SUS: a retrospective. *Journal of usability studies* 8, 2 (2013), 1–12.
- [4] Jack Cuzick. 1985. A Wilcoxon-type test for trend. *Statistics in medicine* 4, 1 (1985), 87–90.
- [5] Donald Degraen, Bruno Fruchard, Frederik Smolders, Emmanouil Potetsianakis, Seref Güngör, Antonio Krüger, and Jürgen Steimle. 2021. Weiriding haptics: In-situ prototyping of vibrotactile feedback in virtual reality through vocalization. In *The 34th Annual ACM symposium on user interface software and technology*. ACM Digital Library, New York, USA, 936–953.
- [6] Laura Faulkner. 2003. Beyond the Five-User Assumption: Benefits of Increased Sample Sizes in Usability Testing. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 35, 3 (2003), 379–383. doi:10.3758/BF03195514
- [7] Daniella Briotto Faustino, Sandra Gabriele, Rami Ibrahim, Anna-Lena Theus, and Audrey Girouard. 2017. SensArt demo: A multisensory prototype for engaging with visual art. In *Proceedings of the 2017 ACM international conference on interactive surfaces and spaces*. ACM Digital Library, New York, USA, 462–465.
- [8] Rebecca Grier, Aaron Bangor, Philip Kortum, and S Camille Peres. 2013. The system usability scale: Beyond standard usability testing. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, Vol. 57. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 187–191.
- [9] Robert S Kennedy, Norman E Lane, Kevin S Berbaum, and Michael G Lienthal. 1993. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology* 3, 3 (1993), 203–220.
- [10] Mark T Marshall and Marcelo M Wanderley. 2011. Examining the effects of embedded vibrotactile feedback on the feel of a digital musical instrument. In *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. NIME, Oslo, Norway, 399–404.
- [11] John McDowell and Dermont J Furlong. 2018. Haptic-Listening and the Classical Guitar. In *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*. NIME, Virginia, USA, 293–298.
- [12] Patrick E McKnight and Julius Najab. 2010. Mann-whitney U test. *The Corsini encyclopedia of psychology* 1, 1 (2010), 1–1.
- [13] Cristina Mele, Tiziana Russo Spena, Marialuiza Marzullo, and Irene Di Bernardo. 2023. The phygital transformation: a systematic review and a research agenda. *Italian Journal of Marketing* 2023, 3 (2023), 323–349.
- [14] Axel Mulder. 1994. Virtual musical instruments: Accessing the sound synthesis universe as a performer. In *Proceedings of the First Brazilian Symposium on Computer Music*. Sociedade Brasileira de Computação (SBC), Porto Alegre, Brazil, 243–250.
- [15] Suranga Chandima Nanayakkara, Lonce Wyse, Sim Heng Ong, and Elizabeth A Taylor. 2013. Enhancing musical experience for the hearing-impaired using visual and haptic displays. *Human-Computer Interaction* 28, 2 (2013), 115–160.
- [16] Jakob Nielsen and Thomas K. Landauer. 1993. A Mathematical Model of the Finding of Usability Problems. In *Proceedings of the INTERCHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 206–213. doi:10.1145/169059.169166
- [17] Sile O'Modhrain and Chris Chafe. 2000. Incorporating haptic feedback into interfaces for music applications. In *Proceedings of the International Symposium on Robotics with Applications, World Automation Conference*. Stanford University, Stanford, USA, 1–6.
- [18] SOMNUK Phon-Amnuaisuk, KIARASH Rezahanjani, HAMID REZA Momeni, and KC Khor. 2009. Virtual musical instruments: air drums. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Information Technology in Asia (CITA 2009)*, Kuching, Sarawak. Springer, Kuching, Malaysia, 95–99.
- [19] Suji Sathiyamurthy, Melody Lui, Erin Kim, and Oliver Schneider. 2021. Measuring Haptic Experience: Elaborating the HX model with scale development. In *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. IEEE, New York, USA, 979–984.
- [20] Oliver Schneider, Karon MacLean, Colin Swindells, and Kellogg Booth. 2017. Haptic experience design: What hapticians do and where they need help. *International Journal of Human-Computer Studies* 107 (2017), 5–21.
- [21] Hasti Seifi and Karon E MacLean. 2017. Exploiting haptic facets: Users' sensemaking schemas as a path to design and personalization of experience. *International Journal of Human-Computer Studies* 107 (2017), 38–61.
- [22] Paul Strohmeyer, Seref Güngör, Luis Herres, Dennis Gudea, Bruno Fruchard, and Jürgen Steimle. 2020. BAREfoot: Generating virtual materials using motion coupled vibration in shoes. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM Digital Library, New York, USA, 579–593.
- [23] Carl Timothy Tolentino, Agatha Uy, and Prospero Naval. 2019. Air Drums: Playing Drums Using Computer Vision. In *2019 International Symposium on Multimedia and Communication Technology (ISMAT)*. IEEE, New York, USA, 1–6.
- [24] Luca Turchet. 2018. Smart Musical Instruments: vision, design principles, and future directions. *IEEE Access* 7 (2018), 8944–8963.
- [25] Luca Turchet. 2023. Musical Metaverse: vision, opportunities, and challenges. *Personal and Ubiquitous Computing* 27, 5 (2023), 1811–1827.
- [26] Luca Turchet, Raffaele Rosaia, Alessandro Diodati, and Marco Carner. 2025. Exposure to vibrotactile music improves audiometric performances in individuals with cochlear implants. *Scientific Reports* 15, 1 (2025), 20054.
- [27] Luca Turchet, Christian Sassi, Davide Vecchia, and Gian Pietro Picco. 2025. Real-Time Musical Haptics With Ultra-Wideband: A Study on Latency, Reliability, and Perception. *IEEE Transactions on Haptics* 18, 1 (2025), 12.
- [28] Luca Turchet, Travis West, and Marcelo M Wanderley. 2019. Smart mandolin and musical haptic gilet: effects of vibro-tactile stimuli during live music performance. In *Proceedings of the 14th International Audio Mostly Conference: A Journey in Sound*. ACM Digital Library, New York, USA, 168–175.
- [29] Luca Turchet, Travis West, and Marcelo M Wanderley. 2021. Touching the audience: musical haptic wearables for augmented and participatory live music performances. *Personal and Ubiquitous Computing* 25, 4 (2021), 749–769.
- [30] Tara Venkatesan and Qian Janice Wang. 2023. Feeling connected: the role of haptic feedback in VR concerts and the impact of haptic music players on the music listening experience. In *Arts*, Vol. 12. MDPI, Basel, Switzerland, 148.
- [31] Rômulo Vieira, Débora C Muchaluat-Saade, and Pablo César. 2023. Towards an internet of multisensory, multimedia and musical things (Io3MT) environment. In *2023 4th International Symposium on the Internet of Sounds*. IEEE, New York, USA, 1–10.
- [32] Rômulo Vieira, Debora Christina Muchaluat-Saade, and Pablo Cesar. 2025. PhysioDrum: Bridging Physical and Digital Realms in Immersive Musical Interaction. In *Proceedings of the 2025 ACM International Conference on Interactive Media Experiences*. ACM Digital Library, New York, USA, 356–358.
- [33] Rômulo Vieira, Débora C. Muchaluat-Saade, Marcelo Rocha, Célio Albuquerque, and Pablo César. 2023. RemixDrum: A Smart Musical Instrument for Music and Visual Art Remix. In *2023 IEEE 9th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*.

- IEEE XPlore, New York, USA, 1–7. doi:10.1109/WF-IoTXXX
- [34] Rômulo Vieira, Shu Wei, Thomas Röggl, Débora C Muchaluat-Saade, and Pablo César. 2024. Immersive Io3MT Environments: Design Guidelines, Use Cases and Future Directions. In *2024 IEEE 5th International Symposium on the Internet of Sounds (IS2)*. IEEE, New York, USA, 1–10.
 - [35] Robert A. Virzi. 1992. Refining the Test Phase of Usability Evaluation: How Many Subjects Is Enough? *Human Factors* 34, 4 (1992), 457–468. doi:10.1177/001872089203400407
 - [36] Bob G Witmer and Michael J Singer. 1998. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence* 7, 3 (1998), 225–240.
 - [37] Harel Yadid, Almog Algranti, Mark Levin, and Ayal Taitler. 2023. A2d: Anywhere anytime drumming. In *2023 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*. IEEE, New York, USA, 1–6.
 - [38] Gareth Young, David Murphy, and Jeffrey Weeter. 2017. A Qualitative Analysis of Haptic Feedback in Music Focused Exercises. In *Proceedings of the New Interfaces for Musical Expression*. NIME, Maynooth, Ireland.
 - [39] Dishant Zaveri, Rajvi Parekh, Russel Lobo, Sanika Ardekar, Vismay Vora, and Aniket Kore. 2022. Aero Drums-Augmented Virtual Drums. In *2022 IEEE 4th International Conference on Cybernetics, Cognition and Machine Learning Applications (ICCCMLA)*. IEEE, New York, USA, 516–520.