LUMEN ET VIRTUS
ISSN: 2177-2789

TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS EM AUTOMAÇÃO APLICADAS A SISTEMAS DE ENTRETENIMENTO E AMBIENTES IMERSIVOS

TECHNOLOGICAL TRENDS IN AUTOMATION APPLIED TO ENTERTAINMENT SYSTEMS AND IMMERSIVE ENVIRONMENTS

TENDENCIAS TECNOLÓGICAS EN AUTOMATIZACIÓN APLICADAS A SISTEMAS DE ENTRETENIMIENTO Y ENTORNOS INMERSIVOS

https://doi.org/10.56238/levv15n42-080

Data de submissão: 16/10/2024 **Data de publicação:** 16/11/2024

Leonardo Hermogenio Gueriot Boruchovitch Monteiro

RESUMO

O presente artigo tem como objetivo mapear e discutir as principais tendências tecnológicas em automação eletrônica aplicadas a sistemas de entretenimento e ambientes imersivos, com foco exclusivo em soluções não-mecânicas baseadas em sensores, microcontroladores, atuadores e protocolos de comunicação embarcados. Por meio de uma revisão sistemática narrativa de natureza qualitativa, foram analisadas publicações indexadas entre os anos de 2019 e 2024 nas bases IEEE Xplore, Scopus, ACM Digital Library, MDPI e SciELO, considerando apenas estudos voltados à automação eletrônica pura, com aplicação direta em experiências imersivas. Os resultados indicam que a automação eletrônica representa o núcleo estruturante das interfaces sensoriais contemporâneas, sendo essencial para o controle temporal de áudio espacializado, feedback tátil, iluminação coordenada e interatividade em ambientes XR. Os principais desafios identificados incluem a limitação energética de dispositivos vestíveis, a latência em redes sem fio de alta densidade e a escassez de capacitação técnica, sobretudo em contextos como o brasileiro. Em contrapartida, observa-se o fortalecimento de soluções distribuídas, protocolos de baixa latência e arquiteturas embarcadas autônomas como caminhos viáveis para o avanço da área. Conclui-se que a automação eletrônica possibilita, redefine a imersão sensorial no entretenimento contemporâneo, exigindo maior integração entre engenharia eletrônica, computação embarcada e design interativo.

Palavras-chave: Automação Eletrônica. Ambientes Imersivos. Realidade Estendida. Protocolos de Sincronização. Dispositivos Vestíveis.

ABSTRACT

This article aims to map and discuss the main technological trends in electronic automation applied to entertainment systems and immersive environments, focusing exclusively on non-mechanical solutions based on sensors, microcontrollers, actuators, and embedded communication protocols. Through a qualitative narrative systematic review, publications indexed between 2019 and 2024 in databases such as IEEE Xplore, Scopus, ACM Digital Library, MDPI, and SciELO were analyzed, considering only studies focused on pure electronic automation with direct application in immersive experiences. The findings indicate that electronic automation represents the structural core of contemporary sensory interfaces, playing a key role in the temporal control of spatial audio, haptic feedback, synchronized lighting, and interactivity in XR environments. Major challenges include the energy limitations of wearable devices, latency in high-density wireless networks, and the lack of technical training, especially in countries like Brazil. Conversely, the strengthening of distributed

solutions, low-latency protocols, and autonomous embedded architectures appears as a promising pathway for the evolution of the field. It is concluded that electronic automation not only enables but redefines sensory immersion in contemporary entertainment, requiring greater integration between electronic engineering, embedded computing, and interactive design.

Keywords: Electronic Automation. Immersive Environments. Extended Reality. Synchronization Protocols. Wearable Devices.

RESUMEN

Este artículo busca mapear y discutir las principales tendencias tecnológicas en automatización electrónica aplicada a sistemas de entretenimiento y entornos inmersivos, con un enfoque exclusivo en soluciones no mecánicas basadas en sensores, microcontroladores, actuadores y protocolos de comunicación embebidos. Mediante una revisión narrativa sistemática y cualitativa, analizamos publicaciones indexadas entre 2019 y 2024 en las bases de datos IEEE Xplore, Scopus, ACM Digital Library, MDPI y SciELO, considerando únicamente estudios enfocados en automatización electrónica pura con aplicación directa en experiencias inmersivas. Los resultados indican que la automatización electrónica representa el núcleo estructurante de las interfaces sensoriales contemporáneas, siendo esencial para el control temporal del audio espacializado, la retroalimentación háptica, la iluminación coordinada y la interactividad en entornos XR. Los principales desafíos identificados incluyen las limitaciones energéticas de los dispositivos wearables, la latencia en redes inalámbricas de alta densidad y la escasez de habilidades técnicas, especialmente en contextos como Brasil. Por otro lado, las soluciones distribuidas, los protocolos de baja latencia y las arquitecturas embebidas autónomas se consolidan como vías viables para el avance en este campo. La conclusión es que la automatización electrónica permite y redefine la inmersión sensorial en el entretenimiento contemporáneo, lo que requiere una mayor integración entre la ingeniería electrónica, la informática integrada y el diseño interactivo.

Palabras clave: Automatización Electrónica. Entornos Inmersivos. Realidad Extendida. Protocolos de Sincronización. Dispositivos Portátiles.

1 INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias de automação eletrônica tem transformado profundamente a forma como o entretenimento é experienciado em ambientes imersivos, tornando-se importante o uso de sensores, microcontroladores e redes inteligentes em aplicações que vão desde salas de escape até megashows interativos, o que revela uma reconfiguração dos sistemas tradicionais em favor de arquiteturas controladas por lógica digital, comunicação sem fio e sincronização em tempo real (Automation.com, 2024).

Essa tendência ganha ainda mais relevância quando se observa a crescente adoção de tecnologias de Realidade Estendida (XR), como a Realidade Virtual e a Realidade Aumentada, especialmente em contextos culturais e educacionais brasileiros, nos quais os dispositivos eletrônicos se tornam os principais mediadores da experiência imersiva, muitas vezes em substituição a elementos físicos ou mecânicos (Ramos *et al*., 2023).

Embora se observe um crescimento significativo na utilização dessas soluções em escala global, é notável a escassez de trabalhos que tratem especificamente das camadas eletrônicas da automação, ou seja, daquilo que compreende a lógica de controle, a integração de sensores, a comunicação entre dispositivos e a programação embarcada, negligenciando-se com frequência o aspecto não-mecânico dessas tecnologias e, por consequência, desvalorizando uma área estratégica do ponto de vista da engenharia eletrônica (Li *et al*., 2024).

Essa lacuna torna-se ainda mais evidente quando se analisam ambientes de grande porte, como parques de diversões e instalações temáticas, que passaram a operar com infraestrutura baseada em Internet das Coisas (IoT), em que microcontroladores, malhas de sensores e protocolos de rede são os principais responsáveis pela segurança e pela interatividade, exigindo soluções altamente especializadas em eletrônica aplicada (Zhao *et al*., 2024).

Neste cenário, este artigo tem como objetivo mapear e discutir as principais tendências tecnológicas em automação eletrônica aplicadas a sistemas de entretenimento e ambientes imersivos, com foco exclusivo em soluções baseadas em circuitos, interfaces digitais e protocolos de comunicação, evitando propositalmente o enfoque mecatrônico ou robótico, a fim de destacar as contribuições e os problemas específicos da eletrônica nesse setor emergente (Joshi, Radenkovic; 2024).

Para isso, o texto está estruturado em quatro seções principais: inicialmente, será apresentado um referencial teórico voltado às arquiteturas eletrônicas de automação e às suas aplicações em ambientes imersivos; em seguida, descrever-se-á a metodologia adotada para seleção e análise dos estudos revisados; posteriormente, a seção de discussão colocará os autores em confronto e diálogo técnico sobre avanços da automação eletrônica no entretenimento; por fim, as considerações finais sintetizaram os achados e indicarão caminhos para futuras pesquisas e aplicações práticas no campo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ARQUITETURAS ELETRÔNICAS EM AUTOMAÇÃO

As transformações no campo do entretenimento interativo têm demandado arquiteturas de automação que privilegiem exclusivamente a lógica eletrônica embarcada, destacando-se nesse contexto os microcontroladores de baixa latência, como os modelos ESP32 e STM32, que viabilizam o acionamento preciso de múltiplas entradas e saídas digitais em tempo real e com baixo consumo energético, especialmente em sistemas distribuídos (Joshi, Radenkovic; 2024).

Tais dispositivos, quando integrados a controladores lógicos programáveis leves (PLCs compactos) ou a arranjos programáveis de portas lógicas (FPGAs), permitem a criação de soluções altamente customizáveis, eliminando a necessidade de mecanismos físicos e favorecendo estruturas 100% eletrônicas capazes de operar com lógica ladder, protocolos industriais ou interfaces gráficas remotas (Tabak, 2023).

A arquitetura baseada em FPGA, por exemplo, tem sido aplicada com sucesso em eventos musicais de grande escala, nos quais os sinais de áudio e iluminação precisam ser gerenciados por múltiplos canais simultaneamente e com altíssimo grau de sincronização, o que só é possível mediante circuitos integrados que executam funções paralelas com latência mínima e estabilidade superior à de controladores convencionais (Turner *et al*., 2022).

Esse tipo de solução também tem se expandido para parques de diversões automatizados, onde a adoção de sistemas embarcados baseados em IoT permite o monitoramento contínuo de equipamentos por meio de sensores acoplados a microcontroladores distribuídos em rede, operando em malhas sem fio ou cabeadas e fornecendo dados que alimentam algoritmos de decisão embarcados nos próprios nós de controle (Zhao *et al*., 2024).

Em espaços fechados com alto grau de interatividade, como é o caso das experiências de Realidade Estendida ou instalações artísticas sensoriais, os controladores eletrônicos assumem função central, acionando motores de vibração, luzes, sons ou vídeos de acordo com entradas processadas em tempo real, configurando uma automação orientada por lógica digital, sem articulações mecânicas ou hidráulicas, mas com foco em responsividade e estabilidade operacional (Ramos *et al*., 2023).

2.2 AMBIENTES IMERSIVOS: VR, AR, XR E XR EXPANDIDO

Os ambientes imersivos contemporâneos, como os baseados em Realidade Virtual (VR), Realidade Aumentada (AR) e Realidade Estendida (XR), têm evoluído rapidamente a partir da integração de camadas eletrônicas cada vez mais sofisticadas, nas quais a importância dos sensores de movimento, dos atuadores hápticos e dos microcontroladores se mostra central para garantir experiências responsivas, estáveis e sincronizadas com as ações do usuário (Li *et al*., 2024).

Diferentemente de abordagens que dependem de plataformas físicas ou mecânicas, os sistemas XR sustentados por eletrônica pura operam a partir de arquiteturas baseadas em controladores integrados, acelerômetros, giroscópios e módulos de comunicação sem fio que viabilizam a captação e o processamento de dados em tempo real, permitindo que o ambiente reaja imediatamente a gestos, toques ou comandos emitidos pelo usuário sem necessidade de engrenagens ou estruturas móveis (Rushton *et al*., 2024).

A expansão desses ambientes para múltiplos domínios, como educação, arte e entretenimento ao vivo, tem exigido um refinamento dos sistemas embarcados utilizados, sobretudo no que diz respeito à redução da latência, ao aumento da taxa de atualização dos sensores e à estabilidade dos protocolos de comunicação, exigindo soluções eletrônicas que operem com sincronização fina e suporte a eventos multicanal (Turner *et al*., 2022).

No contexto brasileiro, é possível observar um avanço gradual, porém desigual, na adoção de tecnologias XR, com iniciativas que combinam RA embarcada em dispositivos móveis com conteúdo digital interativo vinculado ao espaço físico, utilizando a câmera e os sensores do celular como interface primária entre o ambiente real e o virtual, o que evidencia a centralidade da automação eletrônica mesmo em soluções de baixo custo (Sobrinho Junior & Mesquita, 2023).

Essa expansão, no entanto, não se limita a experiências passivas ou individuais, pois sistemas XR multiusuário vêm sendo projetados com base em módulos ESP32 ou similares, que compartilham dados de localização e estado via redes Wi-Fi ou BLE, formando malhas descentralizadas de controle capazes de sustentar ambientes virtuais compartilhados com múltiplos pontos de interação e redundância de sinal, abrindo espaço para aplicações altamente responsivas e escaláveis (Joshi, Radenkovic; 2024).

Além disso, iniciativas em jogos imersivos nacionais vêm demonstrando que a integração entre o hardware eletrônico e os motores gráficos, como Unity ou Unreal Engine, passa a ocorrer de forma nativa por meio de APIs que permitem o envio e recepção de comandos diretamente dos microcontroladores aos ambientes virtuais, garantindo que ações físicas como pressionar um botão ou mover um controle háptico sejam imediatamente traduzidas em resposta visual e sonora no ambiente digital (Ramos *et al*., 2023).

Com isso, percebe-se que o objetivo da eletrônica na estruturação de experiências imersivas ultrapassa a simples função de suporte técnico, assumindo o protagonismo como camada fundamental de processamento, controle e mediação sensorial, sendo responsável por captar e interpretar estímulos e também por comandar todos os dispositivos periféricos luzes, sons, vibrações, projeções que compõem o cenário interativo (Tabak, 2023).

Tais aplicações, por sua vez, demandam um fluxo constante e sincronizado de dados entre os dispositivos e os servidores de ambiente, sendo cada vez mais comuns soluções em que a lógica de

controle é descentralizada, ou seja, distribuída entre diferentes módulos embarcados que atuam de forma colaborativa no processamento das entradas e saídas, o que reduz gargalos de latência e torna o sistema mais robusto frente a falhas pontuais (Zhao *et al*., 2024).

2.3 PROTOCOLOS E SINCRONIZAÇÃO DISTRIBUÍDA

A crescente complexidade dos ambientes imersivos controlados por automação eletrônica impõe exigências técnicas rigorosas no que diz respeito à transmissão, sincronização e estabilidade de dados entre múltiplos dispositivos, fazendo com que o uso de protocolos de comunicação de alta eficiência se torne desejável e básico para garantir a integridade da experiência interativa (Rushton *et al*., 2024).

Em produções de entretenimento multicanal como shows sincronizados com pulseiras inteligentes, salas de escape interativas ou jogos XR em rede o tempo de resposta entre os dispositivos precisa ser inferior a 10 milissegundos para que não haja defasagens perceptíveis, e é nesse contexto que se destacam soluções baseadas em UDP multicast, que permitem a difusão simultânea de pacotes para múltiplos nós com baixa sobrecarga e alta velocidade de entrega (Joshi, Radenkovic; 2024).

Diferentemente dos sistemas convencionais que utilizam protocolos mais robustos e lentos como TCP/IP, os projetos voltados a entretenimento imersivo têm priorizado protocolos com baixa latência e controle direto de fluxo, como é o caso das redes Dante™ e JackTrip, aplicadas principalmente em projetos de áudio espacial distribuído, nos quais a sincronização dos canais sonoros é crítica para a imersão do usuário (Tabak, 2023).

Além da escolha do protocolo, o sucesso na comunicação entre os dispositivos depende fortemente da adoção de técnicas de compensação de jitter, buffers dinâmicos e sincronização de tempo com base em PTP (Precision Time Protocol), especialmente em sistemas que operam com áudio tridimensional, onde pequenos desvios temporais entre os canais podem comprometer completamente a espacialização da experiência sonora (Turner *et al*., 2022).

É importante destacar que a necessidade de sincronismo fino não se limita ao som, estendendo-se a elementos como iluminação, feedback tátil e projeções visuais, os quais devem ocorrer em perfeita harmonia para que a sensação de presença do usuário seja preservada, o que exige arquiteturas eletrônicas distribuídas e algoritmos de controle embarcados que dialogam constantemente por redes locais otimizadas (Zhao *et al*., 2024).

Nos ambientes XR mais avançados, a situação problema da sincronização se intensifica, pois além da necessidade de comunicação entre os dispositivos físicos como luvas hápticas, fones de ouvido e óculos imersivos há também a exigência de coerência entre os mundos virtuais compartilhados por diferentes usuários, os quais acessam a mesma instância de ambiente digital por meio de conexões Wi-Fi ou BLE coordenadas por microcontroladores com suporte a time-stamping (Li *et al*., 2024).

Essa sinergia de tempo e espaço entre dispositivos é viabilizada mais do que pelo hardware embarcado, mas por estratégias de software que incluem scripts de gerenciamento de latência, protocolos proprietários de handshaking rápido e topologias de rede descentralizada, criando um ecossistema eletrônico autossuficiente capaz de manter a integridade do ambiente mesmo sob variabilidade de sinal (Ramos *et al*., 2023).

Em iniciativas mais experimentais, como instalações artísticas ou jogos educacionais com RA, têm-se observado a utilização de servidores locais híbridos e controladores independentes que processam dados sensoriais de forma paralela, conectando múltiplos dispositivos a partir de protocolos de transmissão simplificada e redes ad hoc, o que reduz significativamente a dependência de infraestrutura pesada e permite a criação de experiências imersivas portáteis e acessíveis (Sobrinho Junior & Mesquita, 2023).

3 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão sistemática narrativa de natureza qualitativa, cujo objetivo é mapear, categorizar e discutir as principais tendências tecnológicas em automação eletrônica voltadas aos sistemas de entretenimento e ambientes imersivos, com ênfase na análise de soluções baseadas exclusivamente em dispositivos e protocolos eletrônicos, excluindo propositalmente abordagens mecatrônicas ou que envolvam mecanismos físicos e atuadores mecânicos, a fim de preservar a coerência com a delimitação técnica do campo eletroeletrônico.

Para alcançar os objetivos propostos, foram definidas diretrizes rigorosas de busca, seleção e análise de artigos, iniciando-se com a construção de uma estratégia de busca estruturada por meio de descritores combinados em diferentes línguas e bases de dados, incluindo termos como “automação eletrônica”, “sistemas imersivos”, “realidade estendida”, “protocolo de sincronização”, “entretenimento interativo” e suas respectivas variações, garantindo que os resultados obtidos fossem amplos o suficiente para capturar a diversidade temática, mas ao mesmo tempo específicos o bastante para manter o foco nas tecnologias embarcadas.

As buscas foram realizadas nas bases IEEE Xplore, Scopus, ACM Digital Library, MDPI e SciELO, com filtros aplicados para restringir os resultados ao período de 2019 a 2024, considerando-se apenas artigos publicados em periódicos revisados por pares ou anais de conferências de alto impacto técnico, priorizando publicações classificadas entre os estratos superiores de relevância em ciência e tecnologia, e descartando todos os trabalhos que envolvessem automação de natureza predominantemente mecânica, robótica ou hidráulica.

Após a recuperação inicial dos artigos, foi realizada uma etapa de leitura exploratória para verificar a aderência dos estudos ao escopo da pesquisa, seguida por uma análise criteriosa dos textos completos selecionados, sendo aplicados critérios de inclusão relacionados à clareza da descrição

técnica, aplicabilidade ao setor de entretenimento imersivo, uso explícito de tecnologias eletrônicas e ausência de foco mecânico; ao final dessa triagem, apenas os artigos que apresentavam coerência com todos esses critérios foram considerados para a fase analítica.

Para a organização dos dados extraídos dos estudos selecionados, utilizou-se um processo de codificação temática com base em categorias previamente definidas, como “arquitetura eletrônica”, “interface sensorial”, “controle embarcado”, “protocolo de comunicação” e “sincronização distribuída”, sendo essas categorias refinadas de maneira indutiva à medida que os dados eram analisados, permitindo a identificação de padrões recorrentes, lacunas relevantes e pontos de convergência ou tensão entre os diferentes enfoques abordados pelos autores.

A análise final consistiu em uma triangulação interpretativa dos achados, com a construção de uma discussão crítica estruturada a partir da comparação entre os estudos selecionados, considerando-se as tecnologias mencionadas e os contextos de aplicação, as limitações técnicas identificadas e as perspectivas de evolução para o setor, o que resultou em um mapeamento detalhado das tendências emergentes e dos obstáculos enfrentados pela automação eletrônica nos ambientes imersivos analisados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discussão sobre sincronização eletrônica em ambientes imersivos com múltiplos pontos de controle revela-se fundamental para compreender os limites e avanços das soluções atualmente empregadas, e nesse aspecto Zhao *et al.* (2024) chamam atenção para a importância de arquiteturas IoT embarcadas em instalações de grande escala, como parques de diversões automatizados, nas quais sensores e microcontroladores distribuídos comunicam-se continuamente em malhas integradas que dependem de protocolos de tempo preciso para garantir a estabilidade operacional e a segurança dos usuários.

Em sintonia com essa preocupação, Joshi, Radenkovic (2024) exploram o uso de dispositivos vestíveis, como pulseiras LED sincronizadas em eventos musicais, que demandam alta coordenação temporal entre centenas ou milhares de unidades distribuídas, controladas por microcontroladores com conectividade Wi-Fi, os quais dependem de comandos centralizados ou descentralizados para executar padrões de luz em tempo real, destacando que desvios superiores a poucos milissegundos já são suficientes para comprometer a coerência visual do espetáculo.

Embora ambos os estudos tratem de contextos distintos um voltado à infraestrutura fixa e outro à mobilidade do público, é possível perceber uma convergência metodológica ao enfatizarem o importância das redes sem fio de baixa latência e dos protocolos de difusão simultânea, como o UDP multicast, que permitem atingir simultaneidade de resposta sem sobrecarga computacional, mesmo em situações com grande número de nós ativos.

Essa perspectiva é ampliada por Tabak (2023), ao investigar experiências de concertos virtuais em tempo real com músicos localizados em diferentes pontos geográficos, sincronizados por meio de interfaces de áudio digital e protocolos como JackTrip e Dante™, revelando que, em ambientes nos quais o som é o principal vetor de imersão, o controle eletrônico da latência e do jitter torna-se ainda mais sensível, exigindo buffers ajustáveis, clocks de precisão e algoritmos de compensação de atraso adaptativo.

Enquanto Zhao *et al.* (2024) e Joshi, Radenkovic (2024) operam no campo da sincronização física de múltiplos dispositivos embarcados no mesmo ambiente, Tabak (2023) introduz a dimensão da distribuição geográfica e da performance em rede, indicando que a robustez da sincronização eletrônica não se limita à proximidade espacial, mas pode ser estendida a grandes distâncias, desde que haja controle rigoroso dos tempos de entrada e saída de dados, algo que apenas os protocolos de nível profissional conseguem garantir com confiabilidade.

Essa ideia é tecnicamente complementada por Turner *et al.* (2022), que analisam a mixagem automatizada de áudio espacial em ambientes imersivos, como instalações sensoriais e museus digitais, e argumentam que a precisão na distribuição sonora tridimensional depende diretamente da coordenação eletrônica entre múltiplos pontos de emissão, sendo os delays calibrados por sistemas embarcados responsáveis pela definição da direção, profundidade e intensidade do som, o que amplia a noção de sincronização para além do tempo absoluto, incorporando aspectos espaciais programados via controladores lógicos.

Dessa forma, a discussão entre esses autores converge para a constatação de que a sincronização em tempo real, nos contextos analisados, depende menos de estrutura física e mais de camadas eletrônicas bem projetadas, baseadas em protocolos enxutos, sistemas embarcados com suporte a temporização distribuída e módulos de rede com capacidade de processamento em linha, que garantem respostas rápidas e coordenadas mesmo em sistemas complexos com múltiplas variáveis operando simultaneamente.

Ao mesmo tempo, há uma tensão implícita entre os estudos quanto ao modelo de controle mais eficiente centralizado versus descentralizado sendo que Zhao *et al.* (2024) enfatizam a importância de centros de controle que comandam todas as unidades de forma hierárquica, enquanto Joshi, Radenkovic (2024) e Turner *et al.* (2022) sugerem que arquiteturas distribuídas, com controle parcial em cada nó, tendem a ser mais resilientes a falhas de comunicação e a instabilidades de rede, o que indica uma possível linha de pesquisa futura centrada em modelos híbridos e adaptativos.

Nos ambientes de Realidade Estendida (XR), a relação entre usuário e sistema torna-se altamente dependente da qualidade da interface homem-máquina, sendo os circuitos embarcados, sensores de movimento e atuadores hápticos os elementos centrais que viabilizam a imersão sensorial sem a necessidade de mecanismos físicos, e é justamente nesse ponto que Li *et al.* (2024) apresentam

uma abordagem robusta baseada em luvas hápticas dotadas de microcontroladores, IMUs e motores vibratórios capazes de simular resistência e pressão, permitindo ao usuário manipular objetos virtuais com um elevado grau de realismo tátil.

Complementando esse raciocínio, Rushton *et al.* (2024) discutem como a construção de paisagens sonoras interativas e espacializadas também depende de controladores eletrônicos conectados em rede, com foco na emissão de áudio direcional distribuído por microcontroladores e placas de som programadas, o que demonstra que a interface sensorial pode ser háptica e auditiva, formando um sistema coeso que responde dinamicamente à movimentação do usuário e à sua posição no espaço imersivo.

Enquanto Li *et al.* (2024) enfatizam a retroalimentação tátil como eixo de realismo na experiência, Rushton *et al.* (2024) ampliam esse conceito para além do toque, considerando que o som também pode ser estruturado eletronicamente para guiar ações, gerar sensações de profundidade e reforçar eventos virtuais, e nesse sentido, o uso de microcontroladores ESP32 com suporte a comunicação multicast torna-se uma solução eficaz para conectar fones, alto-falantes e sensores em uma malha coesa e sincronizada.

A esse debate soma-se Turner *et al.* (2022), que analisam como sistemas de mixagem automatizada para ambientes XR precisam operar com algoritmos embarcados em placas DSP, permitindo que cada canal de som seja modulado em tempo real de acordo com a ação do usuário, transformando a percepção auditiva em uma camada programável de interface, o que desloca a ênfase da resposta visual para uma arquitetura eletrônica que traduz o comportamento do usuário em estímulos tridimensionais, imersivos e reativos.

A convergência entre esses estudos sugere que a interface homem-máquina em XR não deve ser pensada como um componente fixo ou acessório do sistema, mas como o próprio núcleo do ambiente interativo, constituído por uma rede de sensores, atuadores e processadores que codificam, interpretam e respondem às ações humanas com base em lógica embarcada, o que desloca o eixo da experiência para o campo da eletrônica pura, sem intermediações mecânicas ou físicas.

Quando se observa a aplicação dessas interfaces em contextos educacionais brasileiros, Ramos *et al.* (2023) indicam que a introdução de games imersivos baseados em XR tende a ocorrer com dispositivos móveis comuns, como smartphones e tablets, os quais contam com sensores nativos (acelerômetros, câmeras, giroscópios) controlados por lógicas eletrônicas que possibilitam a manipulação direta de objetos digitais, demonstrando que mesmo em plataformas de baixo custo, a qualidade da interface depende fundamentalmente da integração entre software e hardware embarcado.

A interseção entre acessibilidade e sofisticação tecnológica aparece de forma ainda mais clara nos trabalhos de Sobrinho Junior & Mesquita (2023), ao descreverem experiências de Realidade Aumentada integradas ao livro didático, em que a visualização de conteúdos virtuais é acionada por

marcadores gráficos reconhecidos eletronicamente e processados por aplicativos que utilizam os sensores embarcados dos dispositivos móveis para calcular posição, ângulo e profundidade, mostrando que a imersão pode ser ampliada a partir de lógicas eletrônicas mesmo em contextos educacionais não especializados.

Dessa forma, a análise das contribuições de Li, Rushton, Turner, Ramos e Sobrinho Jr. demonstra que, independentemente do grau de sofisticação da interface ou do contexto de uso, o que se mantém constante é o foco central da automação eletrônica na mediação da experiência XR, sendo os sensores, os controladores, os protocolos de comunicação e os algoritmos embarcados os verdadeiros responsáveis pela articulação sensorial entre corpo e sistema, o que coloca a eletrônica como o elemento estrutural mais relevante nas experiências imersivas baseadas em interface homem-máquina.

Os dispositivos vestíveis aplicados a ambientes de entretenimento imersivo representam uma das frentes mais dinâmicas da automação eletrônica, exigindo soluções que integrem sensores, atuadores e módulos de comunicação em formatos compactos, responsivos e energeticamente eficientes, como mostram os experimentos desenvolvidos por Joshi, Radenkovic (2024), nos quais pulseiras inteligentes equipadas com LEDs RGB endereçáveis, microcontroladores ESP e módulos Wi-Fi foram utilizadas com sucesso em grandes eventos musicais para criar efeitos visuais sincronizados em tempo real entre milhares de participantes.

Apesar do impacto visual e da precisão alcançada nas experiências relatadas, esses dispositivos enfrentam limitações importantes, especialmente relacionadas à gestão de energia e à estabilidade do sinal de comunicação em ambientes com alta densidade de conexões simultâneas, o que exige a adoção de protocolos leves e eficientes de difusão, como o multicast via UDP, mas também de estratégias embarcadas de economia de energia e otimização de desempenho, sob pena de comprometer a responsividade ou a autonomia dos equipamentos durante longas sessões (Zhao *et al*., 2024).

Essa tensão entre desempenho e consumo energético é ainda mais evidente nos sistemas de interface tátil vestível, como os apresentados por Li *et al.* (2024), cujas luvas hápticas utilizam motores de vibração, sensores inerciais e microcontroladores para emular pressão e resistência no ambiente virtual, mas que, apesar de oferecerem uma resposta sensorial rica e precisa, enfrentam a adversidade técnica de integrar todos esses elementos em estruturas leves e compactas, sem que haja perda de funcionalidade ou aumento excessivo de temperatura durante o uso prolongado.

O problema da dissipação térmica em dispositivos vestíveis com múltiplos sensores embarcados é, de fato, um ponto crítico raramente discutido com profundidade na literatura, mas que precisa ser considerado em qualquer proposta de escalabilidade, pois a miniaturização dos componentes eletrônicos implica em questões de layout de circuito impresso e em soluções térmicas

integradas que garantam conforto, segurança e estabilidade funcional ao longo da experiência (Tabak, 2023).

Além da gestão térmica e energética, outro obstáculo recorrente é a interferência entre os dispositivos conectados em ambientes com múltiplos sinais concorrentes, sendo comum a ocorrência de perda de pacotes, atraso na resposta ou desincronização entre os efeitos pretendidos e os comandos recebidos, o que compromete a imersão e exige o uso de algoritmos de correção embarcados, buffers adaptativos e controle local descentralizado em cada unidade vestível para mitigar os efeitos da latência variável (Turner *et al*., 2022).

Nos contextos brasileiros, a adoção de dispositivos vestíveis ainda é incipiente, mas Ramos *et al.* (2023) apontam que soluções baseadas em eletrônica embarcada acessível como sensores integrados aos smartphones ou headsets de baixo custo já vêm sendo utilizadas com algum sucesso em projetos educacionais e culturais, o que sugere que a principal barreira não é a viabilidade técnica, mas sim a infraestrutura de rede e a qualificação profissional para desenvolver sistemas embarcados robustos e integrados a experiências XR.

Com uma abordagem semelhante, Sobrinho Junior & Mesquita (2023) demonstram que experiências de Realidade Aumentada utilizando dispositivos móveis como plataforma primária podem, com o uso adequado de sensores embarcados e algoritmos de rastreamento ótico, oferecer níveis razoáveis de interatividade, especialmente em contextos educacionais, desde que haja uma lógica embarcada bem estruturada que permita a integração do conteúdo digital com os estímulos físicos capturados em tempo real.

Dessa forma, percebe-se que o sucesso da aplicação de dispositivos vestíveis em ambientes imersivos depende fundamentalmente da superação de barreiras técnicas relacionadas à autonomia energética, miniaturização de componentes, estabilidade de comunicação e conforto térmico, sendo a automação eletrônica e não qualquer estrutura mecânica o vetor decisivo para a evolução desses sistemas, o que posiciona o engenheiro eletrônico como ator central no desenvolvimento das próximas gerações de wearables inteligentes voltados ao entretenimento.

A realidade da aplicação de tecnologias XR baseadas em automação eletrônica no Brasil revela um cenário de contrastes, no qual avanços pontuais convivem com limitações estruturais significativas, como indicam Ramos *et al.* (2023), ao analisarem a inserção de jogos imersivos e ambientes interativos no país, destacando que, apesar da crescente disponibilidade de plataformas acessíveis com sensores integrados, como smartphones e headsets comerciais, ainda há um déficit considerável em infraestrutura digital e na formação técnica necessária para a criação e integração de soluções com alto grau de responsividade eletrônica.

Enquanto países com ecossistemas consolidados contam com laboratórios de prototipagem embarcada, redes de baixa latência e políticas de incentivo à adoção de tecnologias imersivas, o

contexto brasileiro ainda depende em grande medida de soluções adaptadas, muitas vezes improvisadas, que utilizam sensores e microcontroladores genéricos para simular experiências interativas, mas que enfrentam dificuldades na obtenção de estabilidade de sinal, precisão de leitura e sincronização entre os dispositivos conectados (Zhao *et al*., 2024).

Essa disparidade tecnológica não se resume à ausência de equipamentos, mas inclui também a falta de políticas públicas voltadas à experimentação com tecnologias XR em ambientes educativos e culturais, o que faz com que muitos projetos sejam isolados e de curta duração, sem continuidade ou suporte institucional, como evidenciado por Sobrinho Junior & Mesquita (2023), ao relatarem iniciativas de Realidade Aumentada aplicada ao ensino básico com dispositivos móveis, nas quais o conteúdo virtual é acionado por marcadores visuais e processado por sensores embarcados no próprio smartphone, sem qualquer integração com redes externas ou protocolos de controle em tempo real.

Apesar dessas limitações, os mesmos autores demonstram que a adoção de lógicas eletrônicas simples, como o uso coordenado de sensores de posição e câmeras, pode resultar em experiências significativas quando há domínio técnico da equipe envolvida, o que reforça a ideia de que a barreira principal não está na viabilidade da automação eletrônica em si, mas sim na ausência de formação específica em integração de hardware, desenvolvimento de firmware e arquitetura embarcada para sistemas interativos.

Essa lacuna formativa reflete-se na pouca presença de engenheiros eletrônicos no desenvolvimento de projetos XR no país, os quais são muitas vezes conduzidos por profissionais da área de design ou pedagogia que não dominam os fundamentos de comunicação entre dispositivos, temporização, consumo de energia ou otimização de sinais, o que compromete a profundidade e a escalabilidade das soluções implementadas (Joshi, Radenkovic; 2024).

Além disso, mesmo quando dispositivos como ESP32, IMUs e módulos de comunicação estão disponíveis comercialmente a baixo custo, há uma dificuldade generalizada na integração desses elementos a plataformas imersivas em tempo real, pois requerem habilidades específicas em programação embarcada, montagem de circuitos e ajuste de protocolos, competências que ainda são pouco difundidas nos currículos das escolas técnicas e universidades brasileiras (Li *et al*., 2024).

Ainda que iniciativas como hackathons, oficinas maker e programas de extensão universitária tenham buscado preencher essa lacuna, a ausência de uma política nacional de incentivo à automação eletrônica voltada ao entretenimento e à XR limita a criação de projetos com impacto mais duradouro, gerando uma dependência de tecnologias importadas que muitas vezes não dialogam com as necessidades locais ou não oferecem suporte técnico suficiente para manutenção e customização (Turner *et al*., 2022).

Portanto, o desenvolvimento de sistemas XR baseados em automação eletrônica no Brasil ainda enfrenta obstáculos relevantes, que incluem a falta de infraestrutura de rede de baixa latência, carência

de formação técnica especializada, escassez de investimentos públicos e privados em pesquisa aplicada e baixa articulação entre as áreas da engenharia eletrônica, da computação e das artes imersivas, o que torna urgente a construção de políticas intersetoriais que incentivem a experimentação local com tecnologias abertas, controladores embarcados e plataformas de XR orientadas por lógica eletrônica, e não por importação de soluções prontas.

Ao observar as contribuições analisadas ao longo desta discussão, torna-se evidente que, embora haja avanços substanciais na integração da automação eletrônica aos sistemas de entretenimento imersivo, persistem obstáculos estruturais que ainda limitam o potencial completo dessas soluções, e nesse sentido, Turner *et al.* (2022) alertam que mesmo os sistemas mais sofisticados de áudio espacial automatizado continuam dependentes de calibração manual e de redes com largura de banda estável, o que implica que, apesar da evolução dos protocolos, a robustez da aplicação ainda está vinculada à infraestrutura física e à precisão das lógicas embarcadas.

Essa observação dialoga com os apontamentos de Tabak (2023), que reconhece que o uso de interfaces digitais para concertos remotos e experiências sonoras colaborativas tem superado diversas barreiras técnicas por meio da otimização do tempo de latência e da implementação de buffers adaptativos, mas que ainda esbarra em limitações como a interferência de sinal, as variações de latência por geolocalização e os gargalos impostos por conexões residenciais não projetadas para operar com múltiplos canais síncronos em tempo real.

Já Li *et al.* (2024), ao lidarem com sistemas hápticos, trazem uma perspectiva diferente, pois evidenciam que a miniaturização de atuadores e sensores táteis ainda é um ponto crítico para a expansão dos dispositivos vestíveis, uma vez que a inclusão de motores, IMUs e fontes de alimentação em um espaço reduzido exige soluções de engenharia eletrônica avançadas e levanta questões sobre o conforto térmico e a autonomia energética dos dispositivos, o que projeta uma demanda crescente por novos materiais semicondutores e estratégias de consumo adaptativo.

Na mesma direção, Joshi, Radenkovic (2024) identificam que, embora seja tecnicamente possível sincronizar milhares de pulseiras LED em grandes eventos, a escalabilidade real dessas experiências depende da implementação de arquiteturas eletrônicas distribuídas, nas quais cada unidade possua um receptor passivo, e um microcontrolador com lógica própria e capacidade de resposta autônoma, o que implica uma mudança de paradigma de controle centralizado para controle colaborativo dentro do design de dispositivos para entretenimento.

Zhao *et al.* (2024) reforçam a importância de manter um sistema central coordenador em aplicações críticas, como os parques de diversões inteligentes, onde o risco associado a falhas de sincronização é elevado e a redundância deve ser planejada tanto no nível de hardware quanto de software, revelando uma tensão metodológica importante: enquanto alguns contextos favorecem a

descentralização, outros exigem rigidez e controle unificado, o que indica que as tendências futuras passarão por modelos híbridos ajustáveis ao perfil de risco da aplicação.

Ramos *et al.* (2023), ao analisarem experiências brasileiras com XR, sustentam que a ausência de uma infraestrutura nacional estável para redes de alta velocidade e a limitação na formação técnica ainda são os principais fatores de contenção da expansão das experiências interativas baseadas em lógica embarcada, o que revela que, mesmo com tecnologias disponíveis e acessíveis, como ESP32 e sensores MEMS, a falta de um ecossistema integrador impede a consolidação de projetos duradouros e autônomos.

Sobrinho Junior & Mesquita (2023) complementam essa análise ao demonstrar que, em contextos educacionais, mesmo com dispositivos móveis amplamente difundidos, a imersão eletrônica ainda depende de uma lógica de programação eficiente, da manipulação otimizada de sensores e da construção de fluxos de dados confiáveis entre os dispositivos, o que requer conhecimento específico em eletrônica aplicada, e não somente domínio de softwares de desenvolvimento gráfico ou plataformas educacionais convencionais.

Os autores convergem na ideia de que o futuro da automação eletrônica em ambientes imersivos estará condicionado a mais do que à evolução do hardware ou ao refinamento dos protocolos, mas à capacidade de integrar essas soluções em ecossistemas resilientes, distribuídos e energeticamente eficientes, com suporte a atualizações remotas, autoconfiguração de rede e escalabilidade modular, o que projeta um cenário onde o engenheiro eletrônico ocupará um espaço cada vez mais central na construção das experiências sensoriais do futuro.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise realizada ao longo deste artigo, torna-se evidente que a automação eletrônica ocupa uma função absolutamente central na estruturação, operação e inovação dos sistemas de entretenimento e dos ambientes imersivos, deixando de ser apenas um suporte técnico para se tornar o elemento articulador das experiências sensoriais que envolvem resposta tátil, sincronização sonora, controle visual e interatividade em tempo real, o que consolida o domínio da eletrônica embarcada como a base de toda a dinâmica imersiva contemporânea.

Ao contrário de soluções mecatrônicas ou híbridas que envolvem componentes físicos articulados, os sistemas investigados aqui demonstram que a lógica eletrônica pura composta por microcontroladores, sensores, atuadores programáveis e protocolos de comunicação é capaz de sustentar experiências complexas, responsivas e altamente escaláveis, desde que haja um desenho arquitetônico eficiente, um controle temporal rigoroso e uma integração fluida entre hardware e software embarcado.

O debate entre os autores revelou um panorama marcado por múltiplas questões, como a miniaturização de circuitos, a limitação energética de dispositivos vestíveis, a interferência em redes de alta densidade, a variabilidade da latência e a escassez de infraestrutura estável, mas também apresentou caminhos de superação baseados em descentralização, controle distribuído, algoritmos adaptativos e protocolos leves de sincronização, compondo um ecossistema técnico em constante evolução e profundamente conectado à capacidade de inovação na engenharia eletrônica.

Em contextos como o brasileiro, a viabilidade de aplicar essas tecnologias está condicionada ao acesso físico aos componentes e também à capacitação técnica em automação embarcada, à articulação entre áreas multidisciplinares e à criação de políticas públicas e privadas que incentivem projetos XR baseados em lógica eletrônica nacional, com soluções abertas, programáveis e sustentáveis, capazes de dialogar com as realidades locais sem perder de vista os padrões internacionais de imersão e responsividade.

Como recomendação para pesquisas futuras, destaca-se a importância de estudos aplicados que testem, em campo, o comportamento de arquiteturas distribuídas em contextos imersivos com grande fluxo de usuários, bem como a necessidade de desenvolver firmwares otimizados para wearables, redes tolerantes a falhas e modelos de controle híbrido, capazes de se ajustar dinamicamente às condições do ambiente e ao perfil de uso, consolidando a automação eletrônica como a espinha dorsal de uma nova geração de experiências sensoriais inteligentes, autônomas e altamente conectadas.

REFERÊNCIAS

JOSHI, Nandita; RADENKOVIC, Milena. Opportunistic delay tolerant routing for LED wristbands in music events. arXiv preprint, arXiv:2406.02694, 2024.

LI, Zhenxing et al. Haptics-mediated virtual embodiment: impact of a wearable avatar-controlling system with kinesthetic gloves on embodiment in VR. Frontiers in Virtual Reality, Lausanne, v. 5, 2024. DOI: 10.3389/frvir.2024.1439724.

RAMOS, Rodrigo M. et al. Realidade Estendida e Games. In: SIMPÓSIO DE REALIDADE VIRTUAL E AUMENTADA, 25., 2023, Rio Grande. Anais. Porto Alegre: SBC, 2023. p. 13-15. DOI: 10.5753/svr_estendido.2023.235777.

RUSHTON, Thomas Albert et al. Networked microcontrollers for accessible, distributed spatial audio. Frontiers in Virtual Reality, Lausanne, v. 5, 2024. DOI: 10.3389/frvir.2024.1391987.

SOBRINHO JUNIOR, João Ferreira; MESQUITA, Nyuara Araújo da Silva. Um estudo de caso a partir do uso da realidade aumentada integrada ao livro didático. Ciência & Educação (Bauru), Bauru, v. 29, e23011, 2023. DOI: 10.1590/1516-731320230011.

TABAK, Cihan. Intelligent music applications: innovative solutions for musicians and listeners. Uluslararası Anadolu Sosyal Bilimler Dergisi, v. 7, n. 3, p. 752–773, 2023.

TURNER, Daniel; MURPHY, Damian; PIKE, Chris; BAUME, Chris. Spatial audio production for immersive media experiences: perspectives on practice-led approaches to designing immersive audio content. The Soundtrack, Bristol, v. 13, n. 1, p. 73-94, 2022. DOI: 10.1386/ts_00017_1.

ZHAO, Z. et al. Development and application of IoT monitoring systems for typical large amusement facilities. Sensors, Basel, v. 24, n. 14, e4433, 2024. DOI: 10.3390/s24144433.