

Proposta de um sistema tutor inteligente baseado em contexto para apoio em atividades que envolvem manipulação de PCBs

Ramayana Assunção Menezes Júnior¹, Zickson Josue Prestes de Lima Silva²,
Joao Marcos Bezerra do Nascimento², Enrike Rocha Fernandes²,
Jose Francisco Netto¹, Rodrigo Choji de Freitas²

¹Instituto de Computação – Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

²Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

{ramayana, jnetto}@icomp.ufam.edu.br

{zjpdls.eai25, jmbrdn.eai23, erf.eai25, rcfreitas}@uea.edu.br

Abstract. *The manufacturing and maintenance of Printed Circuit Boards (PCBs) require high precision, making operator training susceptible to critical failures. To overcome the limitations of passive inspection systems, this paper proposes a context-aware educational approach for manufacturing training. The approach is materialized in the architecture of an Intelligent Tutoring System that integrates Vision-Language Models (VLMs), Large Language Models (LLMs), and Augmented Reality (AR). A multimodal inference pipeline evaluates the board's physical state and the operator's handling procedures in real time, enabling natural interaction through voice commands and textual chat. By presenting guidance in the workplace and reacting when an unsafe or incorrect action is detected, the approach supports situated learning and immediate corrective feedback. As emerging results, a functional interface prototype and its preliminary technical demonstration are presented. The prototype implements the AR conversational panel and voice-input flow; empirical validation will subsequently investigate error reduction, cognitive load, and industrial usability. The expected contribution is a dynamic and adaptive learning approach for Industry 4.0.*

Resumo. *A manufatura e a manutenção de Placas de Circuito Impresso (PCBs – Printed Circuit Boards) exigem alta precisão, tornando o treinamento de operadores suscetível a falhas críticas. Para superar as limitações dos sistemas passivos de inspeção, este trabalho propõe uma **abordagem educacional baseada em contexto** para o treinamento em manufatura. A abordagem materializa-se na arquitetura de um Sistema Tutor Inteligente que integra Modelos de Linguagem de Visão (VLMs), Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs) e Realidade Aumentada (RA). Um pipeline de inferência multimodal avalia, em tempo real, o estado físico da placa e os procedimentos de manuseio do operador, permitindo interação natural por comandos de voz e chat textual. Ao apresentar orientações no próprio ambiente de trabalho e reagir quando uma ação insegura ou incorreta é detectada, a abordagem favorece a aprendizagem situada e o feedback corretivo e imediato. Como resultados emergentes, apresentam-se um protótipo funcional da interface e sua demonstração técnica preliminar. O protótipo implementa o painel conversacional em RA e o fluxo de*

entrada por voz; a validação empírica posterior investigará redução de erros, carga cognitiva e usabilidade industrial. Espera-se que a abordagem viabilize uma aprendizagem dinâmica e adaptativa para a Indústria 4.0.

1. Introdução

No contexto da Indústria 4.0, a Manufatura Inteligente (*Smart Manufacturing*) tem exigido a integração de tecnologias avançadas para otimizar processos, reduzir falhas e capacitar a força de trabalho [Park et al. 2022]. A manipulação de Placas de Circuito Impresso (PCBs), seja na montagem, inspeção ou manutenção, é uma tarefa altamente complexa, na qual erros milimétricos ou o manuseio inadequado, como o toque sem proteção em terminais sensíveis, podem causar a perda do equipamento [Parikh et al. 2025].

A Realidade Aumentada (RA) tem se consolidado como recurso de apoio à manutenção industrial e à eficiência de quem executa as tarefas [Gélío e César 2022, Silva 2025]. Contudo, a maioria dos sistemas de RA atua de forma passiva, exigindo a navegação manual por menus ou manuais flutuantes que não compreendem as ações do usuário, ou ainda depende de animações tridimensionais (3D) custosas e difíceis de alinhar com o mundo real.

Para suprir essa lacuna de forma viável para prototipagem e uso contínuo, propõe-se o uso de **Sistemas Tutores Inteligentes baseados em contexto** acoplados a interfaces conversacionais apoiadas por Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs). Trabalhos desenvolvidos no âmbito de tecnologias educacionais e ambientes virtuais, como os conduzidos no Instituto de Computação (IComp) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) [Alencar e Netto 2010], demonstram a eficácia de agentes e tutores para o acompanhamento do estado, das atividades e das necessidades de apoio do usuário.

Neste sentido, este trabalho propõe uma **abordagem educacional baseada em contexto** para o treinamento em manipulação de PCBs. A abordagem integra Modelos de Linguagem de Visão (VLMs), LLMs e RA em uma arquitetura de tutoria capaz de avaliar tanto o estado físico da placa quanto a forma de manuseio do operador e de converter esse contexto em intervenções pedagógicas conversacionais. O sistema tutor é o artefato que materializa a abordagem, e não a contribuição isolada do trabalho. Sua interface de chat em RA oferece suporte sob demanda e não linear, adequado aos fluxos de interação não sequenciais da indústria eletroeletrônica. A contribuição central é conceitual e arquitetural: o artigo organiza a hipótese de pesquisa, os componentes tecnológicos e o plano de avaliação da abordagem, fundamentada em aprendizagem situada e feedback corretivo e imediato. Para investigar sua viabilidade, foi desenvolvido um protótipo inicial, apresentado na seção de resultados emergentes, que será ampliado e submetido à validação empírica.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Realidade Aumentada e Treinamento na Indústria

A adoção da RA e da Realidade Virtual (RV) na indústria brasileira vem crescendo como suporte ao trabalho eficiente e seguro, como pode ser observado nos trabalhos de Watanabe et al. [Watanabe et al. 2023], que destacam o uso da RV para análises ergonômicas, e de Silva et al. [Silva et al. 2024b], que evidenciam sua importância na segurança industrial. Segundo a revisão sistemática de Silva [Silva 2025], a RA aplicada à manutenção

industrial aproxima a relação humano-máquina. Em vez de projetar elementos 3D complexos sobre as máquinas, a exibição de painéis textuais e assistentes virtuais no campo de visão reduz o esforço de processamento gráfico e a poluição visual, otimizando a atenção e a carga cognitiva do operador [Nazareth et al. 2014].

2.2. Inspeção Inteligente e Manipulação de PCBs

A percepção de contexto do tutor baseia-se na capacidade de “enxergar” a placa e o operador. A inspeção visual automatizada é uma área madura. Modelos de *Deep Learning* focados na indústria, como o *M2U-InspectNet* [Parikh et al. 2025] e abordagens de *Smart Quality Inspection* [Sundaram e Zeid 2023], permitem detectar anomalias estruturais, como trilhas interrompidas ou soldas frias [Hütten et al. 2024, Shukla et al. 2025]. Na arquitetura proposta, esses algoritmos operam integrados a modelos de rastreamento de ações humanas dentro de um *pipeline* de inferência maior, alimentando a máquina de estados do tutor com descrições semânticas do mundo real — desde defeitos na placa até infrações nas diretrizes de manuseio.

2.3. Sistemas Tutores Inteligentes e Interfaces Conversacionais (LLMs)

Um Sistema Tutor Inteligente baseado em contexto opera pela articulação entre percepção, decisão pedagógica e intervenção instrucional. No cenário de montagem de PCBs, o fluxo de trabalho é majoritariamente repetitivo e frequentemente não sequencial. Alencar e Netto [Alencar e Netto 2010] propuseram o uso de Sistemas Multiagente para acompanhar e apoiar atividades em ambientes virtuais. Com os LLMs, a atuação do tutor pode ser mediada por linguagem natural dinâmica [Ferreira e Silva 2023], permitindo interação por comandos de voz assíncronos em um fluxo conversacional e contextualizado.

2.4. Aprendizagem Situada e Feedback Corretivo e Imediato

A aprendizagem situada compreende que o conhecimento é construído em relação estreita com a atividade, o contexto e a cultura em que será empregado [Lave e Wenger 1991]. No treinamento convencional para manipulação de PCBs, a consulta prévia ou paralela a manuais separa a instrução do ambiente de execução e exige que o operador transfira mentalmente informações abstratas para a placa física. Na abordagem proposta, a RA aproxima esses dois espaços: o chat e os alertas são sobrepostos ao campo de visão enquanto o operador atua na bancada. Desse modo, a aprendizagem ocorre durante a prática e no próprio local de trabalho, reduzindo a barreira cognitiva entre compreender uma orientação e aplicá-la à PCB.

O segundo pilar pedagógico é o feedback corretivo e imediato, entendido como a informação que permite ao aprendiz comparar sua ação com o desempenho esperado e ajustar o procedimento [Hattie e Timperley 2007]. Em tarefas com componentes de montagem superficial (SMDs, *Surface-Mount Devices*) e de tecnologia de furo passante (THT, *Through-Hole Technology*), a postergação da correção pode consolidar um modelo mental inadequado ou permitir danos por descarga eletrostática (ESD, *Electrostatic Discharge*). O *pipeline* multimodal funciona, portanto, como uma malha de percepção e intervenção: monitora continuamente o estado da placa e o manuseio, identifica anomalias estruturais ou ações inseguras e aciona uma orientação no instante da ocorrência. Diante de uma inversão de polaridade, por exemplo, o tutor recomenda a correção antes da continuidade

da montagem, evitando a propagação da falha e associando a explicação pedagógica à ação que a motivou.

3. Trabalhos Relacionados

Recentemente, tecnologias imersivas e algoritmos de aprendizado de máquina vêm sendo explorados em contextos industriais e educacionais. Em inspeção de qualidade de *hardware*, trabalhos como os de Shukla et al. [Shukla et al. 2025], Park et al. [Park et al. 2022] e estudos sobre Redes Neurais Convolucionais (CNNs, *Convolutional Neural Networks*) aplicadas à detecção de defeitos físicos em PCBs [Silva et al. 2023] demonstram o amadurecimento de modelos voltados à classificação estrutural de placas. Entretanto, muitas dessas abordagens permanecem isoladas da rotina de treinamento: produzem alertas corretivos ao final do processo, mas não oferecem mediação pedagógica contínua durante o manuseio.

Arquiteturas de visão computacional para monitoramento ativo também vêm sendo aplicadas em problemas regionais e industriais. Freitas et al. [Freitas et al. 2022], por exemplo, propuseram a plataforma *Curupira Project* para identificação de anomalias em rios amazônicos, evidenciando a utilidade de CNNs na classificação de estados de ambientes físicos. De modo complementar, soluções de supervisão para processos 4.0, como middlewares aplicados à etiquetagem de PCBs [Freitas et al. 2024a], reforçam a importância de conectar percepção visual e sistemas lógicos de acompanhamento.

No campo educacional, Melo et al. [Melo et al. 2023] destacam a relevância de softwares desenvolvidos em parceria com a indústria, enquanto Vieira e Netto [Vieira e Netto 2023] discutem o potencial do aprendizado adaptativo. A abordagem deste artigo combina essas frentes: utiliza visão computacional para fornecer **contexto em tempo real** ao *prompt* de um LLM e transforma a saída do modelo em intervenção instrucional, situada e conversacional.

4. Abordagem Educacional Baseada em Contexto

4.1. Visão Computacional Baseada em Modelos Multimodais (VLMs)

O núcleo cognitivo da abordagem utiliza VLMs [Liu et al. 2024, Gemma Team 2024], que combinam informação visual e textual. Diferentemente dos sistemas de Inspeção Óptica Automatizada (AOI, *Automated Optical Inspection*), normalmente especializados em padrões previamente catalogados, um VLM pode interpretar conjuntamente a placa, a ação observada e as instruções da tarefa.

Na abordagem proposta, modelos abertos como o *Large Language and Vision Assistant* (LLaVA) [Liu et al. 2024] ou Gemma [Gemma Team 2024] podem atuar como motor de inferência. Quadros do vídeo capturado pelos óculos de RA são combinados com instruções textuais e restrições da tarefa, permitindo que a Inteligência Artificial (IA) produza uma descrição contextual do estado da PCB e do manuseio observado.

4.2. Processamento do Contexto em Duas Fases

A arquitetura processa o contexto em duas fases. Na primeira, o VLM interpreta a imagem e produz uma descrição das condições relevantes, como componente ausente, polaridade incompatível ou manuseio inseguro. Na segunda, um modelo de linguagem converte essa

descrição em campos padronizados de anomalia, nível de risco e orientação pedagógica. A representação utiliza a Notação de Objetos JavaScript (JSON, *JavaScript Object Notation*), o que permite à aplicação selecionar o tipo de alerta e apresentá-lo na interface de RA. A Figura 1 ilustra esse fluxo sem vincular a proposta a uma implementação específica.

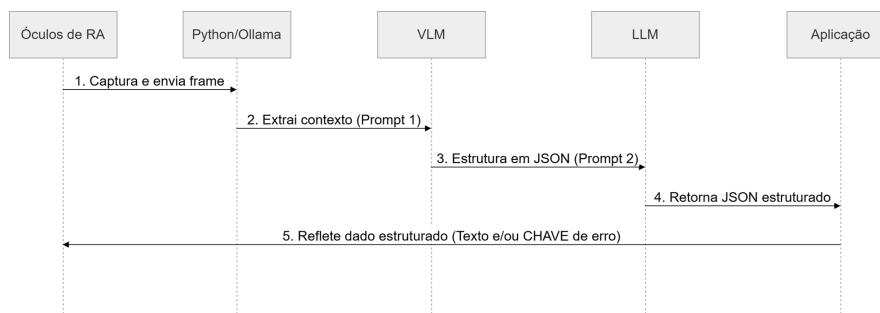


Figura 1. Fluxograma de comunicação entre hardware de RA, processamento local e geração tipada de interface.

4.3. Roteiro Pedagógico das Intervenções

As instruções dos modelos delimitam o escopo técnico e, sobretudo, o comportamento pedagógico do tutor. A análise visual deve identificar somente condições observáveis e indicar incerteza quando a imagem não permitir uma conclusão segura. A etapa de intervenção transforma o diagnóstico em uma mensagem breve composta por quatro elementos: identificação do risco, explicação de sua consequência, ação corretiva executável e solicitação de confirmação antes da continuidade da tarefa.

Esse roteiro evita respostas meramente classificatórias ou excessivamente prescritivas. Em situações críticas, o tutor interrompe a ação e apresenta a correção; em dúvidas de menor risco, oferece uma pista inicial e amplia a explicação sob demanda. Após a correção, solicita que a pessoa em treinamento confirme o procedimento realizado. Essa sequência associa percepção, explicação e ação, favorece a autorregulação e permite reduzir gradualmente o nível de ajuda à medida que o desempenho se estabiliza.

4.4. Cenários de Aplicação e Taxonomia de Erros na Manipulação de PCBs

Para delimitar o escopo de atuação do tutor, propõe-se uma taxonomia de detecção de erros dividida em três eixos práticos relacionados a componentes SMD e THT. A Tabela 1 detalha cenários nos quais o tutor reage proativamente.

Ao contemplar o eixo de manuseio e ESD, o tutor ultrapassa a inspeção de qualidade e apoia a formação de hábitos seguros desde o início do treinamento.

4.5. Segurança da Informação e Inferência Local

A arquitetura prioriza inferência local (*Edge Computing*) para reduzir a exposição de dados sensíveis de projeto, pois quadros de vídeo das PCBs podem revelar propriedade intelectual e detalhes do processo produtivo. Além da privacidade, a execução local de modelos multimodais e de linguagem compactos favorece baixa latência e robustez operacional, requisitos relevantes para manter a fluidez da interface em RA e a utilidade pedagógica do tutor.

Tabela 1. Taxonomia de detecção e intervenção do sistema tutor em PCBs.

Categoria do Erro	Descrição do Cenário Físico	Intervenção Típica do Tutor (RA)
1. Estruturais	Inversão de polaridade, como em capacitores eletrolíticos e diodos emissores de luz (LEDs), desalinhamento grave de circuitos integrados (CIs) ou posições vazias.	<i>“Atenção: a polaridade do capacitor C4 parece invertida. Compare a faixa do polo negativo com a marcação da placa antes de continuar.”</i>
2. Soldagem/Processo	Presença de pontes de solda (<i>solder bridges</i>) com risco de curto-circuito ou solda fria/opaca.	<i>“Há possível excesso de solda entre os pinos 3 e 4. Interrompa a montagem, inspecione a região e remova a ponte com o procedimento de dessoldagem indicado.”</i>
3. Manuseio e ESD	Contato sem luvas antiestáticas com terminais ou trilhas, ou apoio dos dedos na região central da placa.	<i>“Evite o contato sem luvas antiestáticas com terminais e trilhas expostos. Manuseie a placa pelas bordas para reduzir o risco de ESD.”</i>

4.6. Arquitetura da Interface e Fluxo de Interação

Sob a perspectiva de Interação Humano-Computador (IHC), a abordagem prioriza clareza, redução da carga cognitiva e continuidade da tarefa manual. A interação foi estruturada em um painel textual único no campo de visão, com mensagens curtas, acionáveis e contextualizadas. O desenho contempla três camadas: (i) entrada por voz e contexto visual da tarefa; (ii) mediação dialógica por instruções objetivas e confirmação de entendimento; e (iii) apresentação em RA por chat flutuante com hierarquia visual para alertas, recomendações e próximos passos. Assim, a interface atua como mediadora da aprendizagem situada, conduzindo microdecisões sem exigir alternância constante entre bancada, manual e sistema.

4.7. Assistência Contínua e Interação por Voz

O fluxo de trabalho foi concebido para o cenário industrial repetitivo. A interação principal ocorre sem o uso das mãos: o áudio é capturado, convertido de fala para texto (STT, *Speech-to-Text*) e enviado ao chat do LLM junto ao contexto visual inferido, conforme a Figura 2.

O sistema permite duas formas de atuação:

- **Reativa/sob demanda:** a pessoa em treinamento realiza uma pergunta por voz. O LLM utiliza o contexto visual para responder no painel de RA sobre a especificação técnica ou a posição do componente.
- **Proativa (alertas):** ao detectar uma anomalia relevante, o *pipeline* solicita ao tutor uma intervenção no chat, por exemplo: *“A solda no pino 3 parece fria. Interrompa a montagem e inspecione a junção antes de continuar.”*.

5. Resultados Emergentes e Plano de Avaliação

Como resultado emergente, foi desenvolvido um protótipo funcional da camada de interação do sistema tutor. Essa implementação materializa parte da abordagem proposta e permite examinar sua viabilidade técnica antes da integração completa do módulo de inferência multimodal.

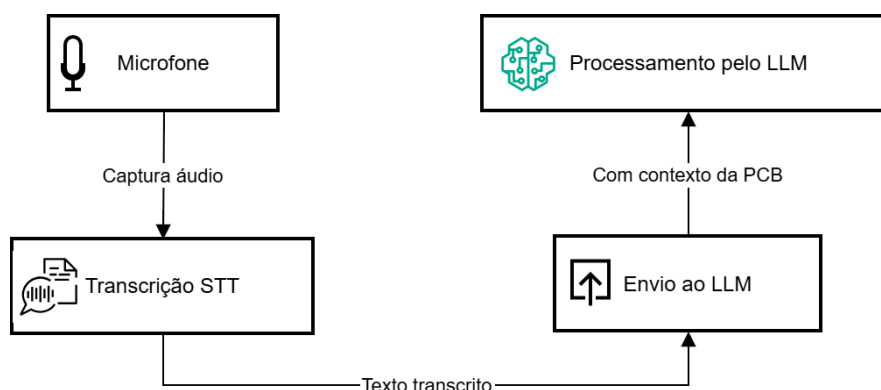
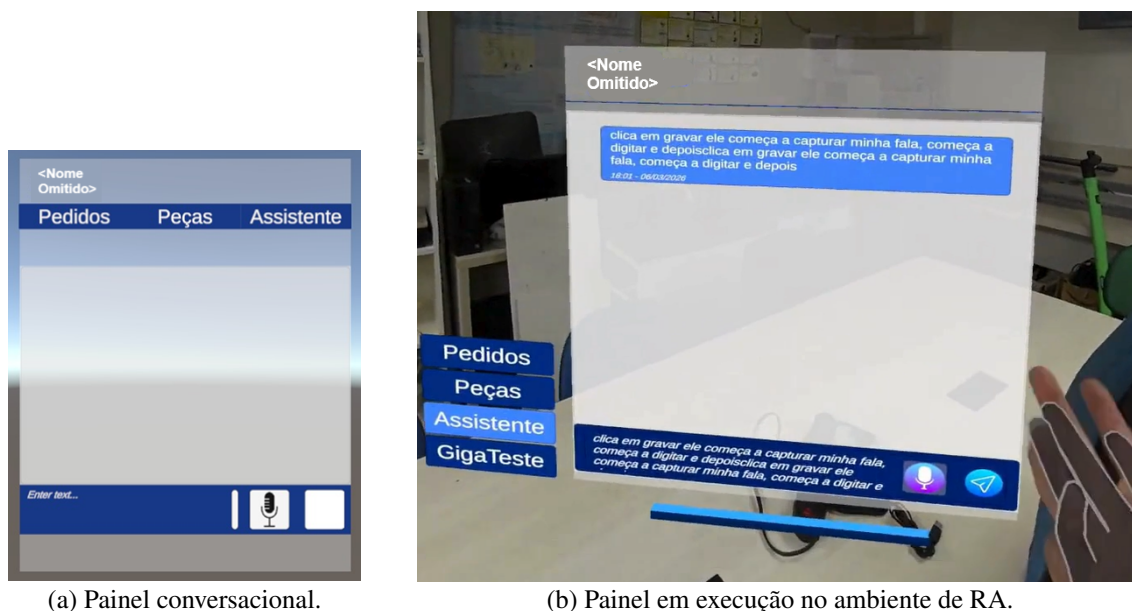


Figura 2. Fluxo de conversão de voz para texto e injeção de prompt no assistente virtual.

5.1. Demonstração Técnica Preliminar

A verificação exploratória percorreu quatro ações essenciais: acesso ao painel do assistente, seleção da entrada por voz, captura e exibição da transcrição e apresentação da mensagem no painel sobreposto ao ambiente físico. A Figura 3 registra duas etapas dessa demonstração. À esquerda, o painel conversacional apresenta navegação, histórico e controles de texto e voz. À direita, o mesmo conceito é executado em RA, com a transcrição da fala exibida no campo de visão durante o uso.



(a) Painel conversacional.

(b) Painel em execução no ambiente de RA.

Figura 3. Evidências do protótipo da interface conversacional e de sua execução em Realidade Aumentada.

Os registros evidenciam a implementação da interface, do fluxo de voz e da legibilidade do painel no ambiente real. Embora ainda não avalie a eficácia pedagógica nem a detecção automática de erros em PCBs, a prova de conceito reduz o risco técnico da camada de interação e oferece uma base para integrar percepção visual, intervenções e coleta de eventos de uso.

5.2. Validação Empírica Planejada

Para avaliar posteriormente a eficácia da abordagem no apoio à aprendizagem, delineou-se um protocolo experimental focado em usabilidade, carga cognitiva e redução de erros.

5.3. Configuração do Ambiente e Participantes

O estudo envolverá uma amostra de pessoas em fase inicial de treinamento industrial. Os participantes serão divididos aleatoriamente em dois grupos:

- **Grupo A (controle):** realizará a montagem e a inspeção da PCB com métodos tradicionais de treinamento, como manuais impressos e esquemáticos bidimensionais (2D) em monitores.
- **Grupo B (experimental):** executará a mesma tarefa utilizando óculos de RA acoplados ao sistema tutor alimentado pela inferência multimodal.

5.4. Tarefas e Cenário Prático

A tarefa consistirá na inspeção e no manuseio de uma PCB com componentes SMD e THT, além da identificação de falhas introduzidas no lote de treinamento, como resistores com valores trocados ou ausência de proteção antiestática. O fluxo não exigirá uma ordem de montagem específica, permitindo avaliar a resposta do tutor a eventos não sequenciais.

5.5. Métricas de Coleta de Dados

Além da demonstração técnica, a próxima fase empregará métodos quantitativos e qualitativos pautados em três métricas primárias:

1. **Desempenho e retenção de erros:** medição do Tempo de Conclusão da Tarefa (TCT) e contagem de falhas não percebidas ao fim da montagem. A ocorrência, o tempo de emissão e a resposta aos alertas também serão registrados para examinar o efeito do feedback corretivo e imediato.
2. **Carga cognitiva:** aplicação do Índice de Carga de Trabalho da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA-TLX, *National Aeronautics and Space Administration Task Load Index*) para estimar esforço mental, físico e frustração durante a interação.
3. **Usabilidade:** aplicação da Escala de Usabilidade do Sistema (SUS, *System Usability Scale*) ao Grupo B para aferir a aceitação da interface textual e da interação por voz.

6. Considerações Finais

A integração de Sistemas Tutores Inteligentes conversacionais com Realidade Aumentada e Visão Computacional oferece uma alternativa promissora para a capacitação técnica na Indústria 4.0. Em aderência à Trilha de Ideias Inovadoras e Resultados Emergentes, este trabalho apresentou uma abordagem educacional em estágio inicial, com componentes arquiteturais definidos e um protótipo funcional da camada de interação: painel textual em RA, entrada por voz e exibição da transcrição no ambiente de uso.

Ao substituir animações 3D complexas por um chat contextual alimentado por LLM, a abordagem vincula a instrução ao ambiente de execução. A demonstração confirma a viabilidade da interface e do fluxo de voz, mas ainda não permite concluir sobre ganhos de aprendizagem. Como próximos passos, a integração multimodal e a validação com participantes analisarão TCT, erros remanescentes, carga cognitiva pelo NASA-TLX e usabilidade pela SUS, verificando os efeitos do feedback imediato na propagação de erros e na aprendizagem situada.

Declaração de Uso de IA Generativa

Este trabalho discute o uso de modelos de linguagem e de visão-linguagem como componentes da arquitetura proposta. Ferramentas de IA generativa também foram utilizadas como apoio ao processo de redação, revisão textual e formatação em LaTeX do artigo, conforme as normas do evento.

Disponibilização de Artefatos

Por se tratar de uma pesquisa em andamento, os artefatos de software, *prompts*, fluxos de interação e materiais de avaliação serão organizados para disponibilização pública após a etapa de validação empírica, respeitando restrições de propriedade intelectual e anonimização dos participantes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com financiamento da empresa Zilia, no âmbito das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento do projeto iRMA, com recursos oriundos da Lei nº 8.387/1991, à qual qualquer publicidade dos resultados desse projeto deve fazer referência, conforme o Art. 48 do Decreto nº 6.008/2006. Contou também com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (AUXPE-CAPES-PROEX) – Código de Financiamento 001 e com financiamento parcial da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM – por meio dos projetos PDPG-CAPES, POSGRAD 2025–2026 e POSGRAD 2026–2027.

Referências

- ALENCAR, M. A. S.; NETTO, J. F. M. Sistema Multiagente para Apoiar a Percepção e o Acompanhamento de Atividades em Ambientes Virtuais de Aprendizagem. In: *Anais do XXX Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (CSBC)*. Belo Horizonte, MG, Brasil, 2010. p. 1417-1420.
- SILVA, F. S. D.; SÁ, T. R. D.; LIMA, K. A. S.; FREITAS, R. C. D.; PEREIRA, K. S.; JÚNIOR, R. A. M.; ALVES, N. F.; CARVALHO, M. G.; FLORES, L. G. Utilizando Redes Neurais Convolucionais para Automatizar a Detecção de Defeitos Físicos em PCBs na Indústria 4.0. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)*. 2023. DOI: 10.20906/SBAI-SBSE-2023/3800.
- FERREIRA, A. R.; SILVA, A. C. Sistema de Linguagem Dinâmica para a Criação e o Processamento de Rotinas Interativas e Procedurais Sobre Cenários de Ambientes de Realidade Virtual Imersivos. *Instituto Federal Goiano*, Morrinhos, GO, 2023.
- FREITAS, R. C.; ALVES, N. F.; MENEZES, R. A. et al. Curupira Project: A Platform for Intelligent Monitoring of Waste in Amazon Rivers. In: *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI)*. Curitiba, PR, Brasil: SBC, p. 1-8, 2022.
- GÉLIO, L. G.; CÉSAR, F. I. G. Utilização da realidade aumentada na manutenção industrial. *Revista Científica Acerte*, v. 2, n. 2, p. e2262, 2022.
- GEMMA TEAM, et al. Gemma: Open models based on gemini research and technology. *arXiv preprint arXiv:2403.08295*, 2024.

- HATTIE, J.; TIMPERLEY, H. The power of feedback. *Review of Educational Research*, v. 77, n. 1, p. 81–112, 2007.
- HÜTTEN, N. et al. Deep Learning for Automated Visual Inspection in Manufacturing and Maintenance: A Survey of Open-Access Papers. *Applied System Innovation*, v. 7, n. 11, 2024.
- LIU, H., et al. Visual instruction tuning. *Advances in neural information processing systems*, 36, 2024.
- LAVE, J.; WENGER, E. *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- MELO, R.; PIRES, F.; MENEZES, R. A.; CHOJI, R. Um projeto de desenvolvimento de software em parceria com a indústria: um estudo de caso em Educação em Computação. *RENOTE - Revista Novas Tecnologias na Educação*, v. 21, n. 1, p. 24-33, 2023.
- SILVA, et al. Middleware de Supervisão de Processos 4.0: Uma aplicação de Etiquetagem de PCBs. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*. 2024. DOI: 10.20906/CBA2024/4796.
- NAZARETH, D. R.; ALENCAR, M. A. S.; NETTO, J. F. M. ELRA - Ensino de Libras usando Realidade Aumentada. *EST/Universidade do Estado do Amazonas*, Manaus, AM, Brasil, 2014.
- PARIKH, M. et al. Deep Learning for Automated Defect Detection in Industrial Manufacturing. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC-2025)*, 2025.
- PARK, S.-H. et al. Deep Learning-Based Defect Detection for Sustainable Smart Manufacturing. *Sustainability*, v. 14, n. 2697, 2022.
- ROMERO, D., et al. The Operator 4.0: human cyber-physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems. In: *IFIP international conference on advances in production management systems*. Springer, 2016. p. 677-686.
- SHINGO, S. *Zero quality control: Source inspection and the poka-yoke system*. CRC press, 1986.
- SHUKLA, V. et al. A systematic survey: role of deep learning-based image anomaly detection in industrial inspection contexts. *Frontiers in Robotics and AI*, v. 12, 1554196, 2025.
- SILVA, A. P. et al. Metodologia para aplicação de realidade virtual em treinamentos de integração de segurança industrial. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, v. 22, n. 12, 2024.
- SILVA, D. B. A. *Revisão sistemática sobre a realidade aumentada aplicada no processo de manutenção da indústria brasileira*. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação) - Instituto Federal Goiano, Morrinhos, GO, 2025.
- SUNDARAM, S.; ZEID, A. Artificial Intelligence-Based Smart Quality Inspection for Manufacturing. *Micromachines*, v. 14, n. 570, 2023.

MOTA VIEIRA, A. V.; MAGALHÃES NETTO, J. F. Adaptive learning in programming education: A systematic mapping of the literature. In: *2023 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. 2023. p. 1–7. DOI: 10.1109/FIE58773.2023.10342933.

WATANABE, G. Y.; CATAPAN, M. F.; SIERRA, I. S. Proposta de um sistema de análise ergonômica auxiliada por realidade virtual na indústria de manufatura. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, v. 12, n. 1, p. 01-22, 2023.