

ESTADO DE CONHECIMENTO SOBRE ABORDAGENS TECNOLÓGICAS PARA APRIMORAR O ENSINO DE COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO (CNC)

*STATE OF KNOWLEDGE ON TECHNOLOGICAL APPROACHES TO ENHANCE THE
TEACHING OF COMPUTER NUMERICAL CONTROL (CNC)*

Isac Barbosa de Almeida

ORCID 0000-0002-4265-039X

Programa de Pós-Graduação em Ensino da Rede
Nordeste de Ensino, RENOEN-IFRN
Mossoró, Brasil
isac.barbosa@ifrn.edu.br

Carla Katarina de Monteiro Marques

ORCID 0000-0002-9608-3968

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Rio Grande do Norte, IFRN
Mossoró, Brasil
carla.marques@ifrn.edu.br

Albino Oliveira Nunes

ORCID 0000-0002-3585-2137

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Rio Grande do Norte, IFRN
Mossoró, RN, Brasil
albino.nunes@ifrn.edu.br

Sandra Maria Campos Alves

ORCID 0000 0002-9343-9324

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Rio Grande do Norte, IFRN
Ipanguaçu, Brasil
sandra.campos@ifrn.edu.br

Diogo Pereira Bezerra

ORCID 0000-0002-0159-4117

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Rio Grande do Norte, IFRN
Ipanguaçu, Brasil
diogo.bezerra@ifrn.edu.br

Resumo. Este estado de conhecimento aborda o ensino de Comando Numérico Computadorizado (CNC), uma tecnologia fundamental para a manufatura moderna, e os desafios enfrentados devido aos altos custos associados à aquisição e manutenção de equipamentos CNC. O objetivo é revisar sistematicamente a literatura existente sobre o tema, com foco nas soluções tecnológicas propostas para superar essas barreiras financeiras e melhorar o processo de ensino-aprendizagem. O autor realizou uma revisão abrangente utilizando bases de dados como IEEE, Portal de Periódicos da CAPES e BDTD, selecionando estudos relevantes sobre simuladores virtuais, aplicativos de realidade aumentada, plataformas online e projetos de desenvolvimento de máquinas CNC de baixo custo para fins didáticos. A análise dos trabalhos evidencia a necessidade de uma plataforma gratuita, inovadora e totalmente didática para ensinar programação CNC de forma eficiente. Os simuladores existentes, embora proporcionem uma experiência virtual, carecem de recursos pedagógicos eficientes para auxiliar os estudantes na compreensão dos conceitos fundamentais. Além disso, muitos desses simuladores exigem conhecimentos prévios, dificultando o processo de aprendizagem para iniciantes. O estado de conhecimento destaca a importância de superar as barreiras de custo e acesso, oferecendo uma abordagem pedagógica sólida, projetada especificamente para ensinar programação CNC de forma intuitiva e gradual, guiando os estudantes desde os conceitos básicos até a criação de programas mais complexos, fornecendo recursos interativos, exercícios práticos e *feedback* constante.

Palavras-chave: Ensino CNC; Comando Numérico Computadorizado; simuladores virtuais; recursos didáticos;

Abstract. This state of knowledge addresses the teaching of Computer Numerical Control (CNC), a fundamental technology for modern manufacturing, and the challenges faced due to the high costs associated with the acquisition and maintenance of CNC equipment. The objective is to systematically review the existing literature on the topic, focusing on the technological solutions proposed to overcome these financial barriers and improve the teaching-learning process. The author conducted a comprehensive review using databases such as IEEE, CAPES Journals Portal, and BDTD, selecting



relevant studies on virtual simulators, augmented reality applications, online platforms, and low-cost CNC machine development projects for educational purposes. The analysis of these works highlights the need for a free, innovative, and fully didactic platform to efficiently teach CNC programming. Existing simulators, while providing a virtual experience, lack efficient pedagogical resources to assist students in understanding fundamental concepts. Furthermore, many of these simulators require prior knowledge, hindering the learning process for beginners. The state of knowledge emphasizes the importance of overcoming cost and access barriers by offering a solid pedagogical approach, specifically designed to teach CNC programming intuitively and gradually, guiding students from basic concepts to the creation of more complex programs, providing interactive resources, practical exercises, and constant feedback.

Keywords: CNC teaching; Computer Numerical Control; virtual simulators; educational resources;

1. INTRODUÇÃO

O ensino do Comando Numérico Computadorizado (CNC) é fundamental para a formação de profissionais qualificados na área de manufatura moderna. As máquinas CNC são amplamente utilizadas na indústria para diversos processos de usinagem, como fresamento, torneamento e furação, sendo essenciais para a produção de peças com alta precisão e eficiência. Conforme destacado por Min Jou (2005), o desenvolvimento da formação de engenheiros em máquinas computadorizadas torna-se muito mais difícil do que com máquinas tradicionais, devido ao custo extremamente alto do ensino, o que limita as possibilidades de aprendizado prático. Contudo, o processo de ensino e aprendizagem dessa tecnologia enfrenta desafios significativos. Entre eles, destacam-se os elevados custos associados à aquisição e manutenção de equipamentos CNC.

Abdulrasool et al. (2010) apontam que estes métodos tradicionais de ensino não são adequados para atender às necessidades do futuro, especialmente em disciplinas que envolvem tecnologias como CAD, CAM e CNC. Sanches (2009) também ressalta esta questão ao desenvolver uma fresadora CNC de baixo custo para fins didáticos, destacando que as barreiras financeiras restringem significativamente o acesso dos estudantes a experiências práticas com estas tecnologias.

Os métodos tradicionais de ensino, que utilizam máquinas físicas em laboratórios, frequentemente são limitados pela disponibilidade e acesso restrito aos equipamentos. Isso resulta em oportunidades práticas insuficientes para os estudantes. Além disso, o risco de danos acidentais às máquinas durante o treinamento é uma preocupação constante, o que pode acarretar despesas adicionais e interrupções no processo de aprendizagem.

Diante desses desafios, pesquisadores e educadores têm buscado abordagens inovadoras para aprimorar o ensino de CNC, explorando o potencial das tecnologias digitais e da realidade virtual. Simuladores virtuais, aplicativos de realidade aumentada e plataformas de aprendizado online têm sido investigados como alternativas viáveis e acessíveis para complementar ou, em alguns casos, substituir parcialmente o treinamento prático em máquinas físicas.

Tsai et al. (2012) investigaram os efeitos das características de realidade virtual, como riqueza de mídia e interatividade, demonstrando uma forte influência positiva na intenção de aprender a utilizar simuladores virtuais de CNC. De forma complementar, Muthupalaniappan et al. (2014) abordaram a importância do ensino de usinagem CNC para a indústria manufatureira moderna e desenvolveram uma plataforma de aprendizado baseada na web que permite a operação remota de um torno CNC de baixo custo.

No entanto, apesar dos avanços significativos nessas tecnologias educacionais, Caixeta (2016) observa que muitos simuladores existentes apresentam limitações, como a dependência de sistemas operacionais específicos e a falta de recursos didáticos que auxiliem na aprendizagem de CNC para iniciantes. Dos Santos et al. (2023) e Marinho et al. (2022) também destacam a necessidade de soluções de baixo custo que possam auxiliar no emprego de

metodologias ativas para uma aprendizagem centrada no aluno, particularmente em ambientes acadêmicos e de ensino de engenharia.

Este estado de conhecimento tem como objetivo revisar de forma sistemática a literatura existente sobre o ensino de CNC, com foco nas soluções tecnológicas propostas para superar os desafios enfrentados nessa área. Serão analisados trabalhos que abordam desde simuladores virtuais até projetos de desenvolvimento de máquinas CNC de baixo custo para fins didáticos. O estudo visa identificar as tendências, avanços e lacunas nesse campo, contribuindo para o aprimoramento das metodologias de ensino e a formação mais eficiente de profissionais capacitados para atuar com as tecnologias CNC na indústria moderna.

A relevância deste trabalho se justifica pela necessidade de superar as barreiras financeiras e de acesso identificadas por diversos autores (Min Jou, 2005; Sanches, 2009; Abdulrasool et al., 2010), oferecendo uma abordagem pedagógica sólida que, como sugerido por Alves et al. (2013) e Gomes (2020), possa democratizar o acesso ao conhecimento técnico especializado em CNC, particularmente em contextos educacionais com recursos limitados. Ao compreender o estado atual das pesquisas e identificar as abordagens mais promissoras, este estudo busca fornecer subsídios para o desenvolvimento de novas estratégias pedagógicas que possam tornar o aprendizado de conceitos de manufatura mais efetivo em cursos de engenharia.

2. METODOLOGIA

Este estudo empregou uma metodologia de revisão sistemática da literatura para investigar o estado de conhecimento sobre abordagens tecnológicas no aprimoramento do ensino de Comando Numérico Computadorizado (CNC). A revisão sistemática, conforme definida por Kitchenham (2004) é um método rigoroso e explícito para identificar, selecionar e avaliar criticamente pesquisas relevantes, além de coletar e analisar dados dos estudos incluídos.

As principais fontes de dados utilizadas foram o IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers), o Portal de Periódicos da CAPES e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD). Estas bases foram escolhidas devido à sua relevância e abrangência na área de engenharia e tecnologia, incluindo publicações acadêmicas nacionais e internacionais. A estratégia de busca envolveu o uso de termos específicos como "cnc learning" e "ensino cnc", utilizando operadores booleanos como AND para combinar termos e aspas para buscar expressões exatas.

Na condução desta revisão sistemática, não foi adotado um *framework* específico, mas empregou-se uma técnica estruturada em quatro etapas sequenciais para identificação e seleção dos trabalhos relevantes. Quanto aos critérios de inclusão e exclusão, devido à quantidade limitada de conteúdo específico para o tema, não houve restrição de trabalhos com base na data de publicação. Foram excluídos, entretanto, os artigos que não abordavam diretamente o ensino de CNC, bem como publicações duplicadas encontradas em diferentes plataformas.

Os critérios de inclusão focaram em estudos que abordassem diretamente o ensino de CNC e as tecnologias aplicadas para seu aprimoramento. O processo de seleção foi conduzido em quatro etapas: busca inicial nas bases de dados, análise preliminar de títulos e resumos, leitura completa dos trabalhos selecionados e seleção final dos estudos mais relevantes para a revisão. A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, identificando as principais abordagens tecnológicas, suas vantagens e limitações no contexto do ensino de CNC. Esta abordagem metodológica sistemática permitiu uma revisão da literatura existente sobre o tema. Os trabalhos analisados estão demonstrados no Quadro 1.

É importante reconhecer algumas limitações metodológicas inerentes a este estudo. A pesquisa concentrou-se principalmente em publicações em língua inglesa e portuguesa, restringindo-se a bases de dados específicas. Além disso, a natureza qualitativa da análise pode introduzir certo grau de subjetividade na seleção e interpretação dos estudos, especialmente considerando que não foram empregadas técnicas formais de triangulação ou codificação

sistemática para redução dessa subjetividade. A triangulação, que envolve o uso de múltiplas perspectivas, fontes de dados ou pesquisadores para analisar um mesmo fenômeno, e a implementação de um sistema de codificação estruturado, poderiam ter fortalecido a confiabilidade e objetividade dos resultados apresentados. Essas limitações devem ser consideradas ao interpretar os resultados e poderiam ser endereçadas em pesquisas futuras sobre o tema. Apesar dessas restrições, a metodologia adotada procurou manter o máximo de rigor durante o processo de seleção e análise dos estudos, oferecendo uma visão do estado atual do ensino de CNC e fornecendo ideias para o desenvolvimento de soluções educacionais nesta área.

A metodologia adotada proporcionou uma base sólida para a identificação do estado atual do conhecimento e das lacunas existentes na área de ensino de CNC, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada das abordagens tecnológicas utilizadas neste campo e suas implicações para o processo de ensino-aprendizagem.

Quadro 1. Sistematização do corpus da pesquisa

TÍTULO	AUTOR(A) E ANO	PLATAFORMA
Development of an interactive e-learning system to improve manufacturing technology education	(Min Jou; Chia-Wan Lin, 2005)	IEEE
Development of an e-learning system for teaching machining technology	(Min Jou, 2005)	IEEE
Desenvolvimento de uma fresadora CNC de baixo custo para fins didáticos	(Sanches, 2009)	BDTD
Desenvolvimento de um programa didático computacional destinado à geração de códigos de comando numérico a partir de modelos 3D obtidos em plataforma CAD considerando a técnica prototipagem rápida	(Miranda, 2009)	BDTD
Intelligent environment for CNC machine operator training	(Weiqun Yang; Lihong Qiao, 2010)	IEEE
Teachers' and Students' Attitudes Towards Traditional and Computer Assisted Blended Teaching and Learning Processes in Mechanical Engineering Subjects Area	(Salah Abdulrasool; R. Mishra; H. Khalaf, 2010)	IEEE
Investigating the effect of virtual reality application on teaching assistance for machine tools operation education	(Tsai; Kao; Lee, 2012)	IEEE
Vantagens do Uso de Simuladores Gráficos no Curso de Programação em CNC para Alunos de Engenharia Mecânica	(Alves; Schimiguel; De Araújo, 2013)	CAPES
A low-cost web-based learning platform for CNC machining education	(Muthupalaniappan et al., 2014)	IEEE
Using Edgcam for creating CNC programs in education process	(Botko et al., 2015)	IEEE
Python based 3-Axis CNC plotter	(Shivakumar; Sravan; Selvajyothi, 2016)	IEEE
Developing an CNC lathe augmented reality application for industrial maintenance training	(Güler; Yücedağ, 2018)	IEEE
Mill Instructor: Teaching Industrial CNC Procedures Using Virtual Reality	(Kesler et al., 2020)	IEEE
Construção de fresadora de baixo custo controlada computacionalmente, para aplicações didáticas	(Gomes, 2020)	CAPES

TÍTULO	AUTOR(A) E ANO	PLATAFORMA
Protótipo CNC: um novo recurso para ambientes maker como apoio didático ao ensino/aprendizagem em cursos de Robótica Educacional	(Dos Santos et al., 2022)	CAPES
Desenvolvimento de máquina de comando numérico de baixo custo para auxílio nos métodos de ensino e aprendizagem na engenharia	(Marinho et al., 2022)	CAPES
Soluções adaptadas de baixo custo para o desenvolvimento de máquina de manufatura híbrida	(Dos Santos et al., 2023)	CAPES

Fonte: O autor (2024).

Os termos de busca foram cuidadosamente selecionados para abranger os aspectos fundamentais do projeto, e as buscas foram realizadas utilizando operadores booleanos para refinar os resultados. Inicialmente, utilizou-se o metadado "cnc learning" entre aspas, resultando em apenas dois trabalhos relacionados. Diante da escassez de resultados, uma nova pesquisa foi conduzida, desta vez sem aspas, ampliando o escopo da busca e resultando em 327 trabalhos.

Após a análise preliminar dos títulos e resumos, constatou-se que uma parcela significativa dos estudos estava relacionada a "deep learning" e "machine learning", tópicos que não são o foco principal desta pesquisa, sendo, portanto, descartados da seleção final. Ao final, dez trabalhos foram selecionados como base para a compreensão do estado atual da pesquisa em aprendizagem em CNC.

Visando uma análise mais aprofundada, utilizou-se também o Portal de Periódicos da CAPES, pesquisando os metadados: ensino cnc, cnc learning e "cnc learning". Para o metadado ensino cnc, foram encontrados 17 artigos, dos quais 5 estavam correlacionados com o tema da pesquisa. Ao utilizar o metadado cnc learning, foram encontrados 1692 estudos, porém, a maioria não se enquadrava na pesquisa. Assim, optou-se por utilizar "cnc learning", focando nos estudos específicos sobre ensino de CNC, resultando em 8 artigos, alguns semelhantes aos encontrados na plataforma IEEE. Por fim, realizou-se uma última pesquisa na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), com o metadado ensino cnc, encontrando 14 dissertações e 3 teses, das quais somente 2 dissertações apresentavam pontos relevantes para este trabalho.

3. RESULTADOS

Um dos trabalhos pioneiros sobre ensino em CNC (Comando Numérico Computadorizado) foi realizado por Min Jou e Chia-wan Lin (2005). Em seu artigo, os autores abordaram o desenvolvimento de um sistema de aprendizagem online voltado para o ensino de tecnologia de manufatura. Nesse sistema, o aluno tem a oportunidade de simular a trajetória do corte, proporcionando uma experiência semelhante à de um simulador, como um laboratório virtual de CNC.

O desenvolvimento da formação de engenheiros em máquinas computadorizadas torna-se muito mais difícil do que com máquinas tradicionais. Isso ocorre devido ao custo extremamente alto do ensino, o que limita as possibilidades. A qualidade de ensino nem sempre pode ser aprimorada nesse aspecto. Os métodos tradicionais de ensino não são adequados para atender às necessidades do futuro (Min Jou, 2005).

No contexto educacional, o ensino de CNC enfrenta desafios devido aos elevados custos das máquinas utilizadas. Visando superar essa barreira e proporcionar uma experiência prática aos estudantes, Sanches (2009) em sua dissertação desenvolveu um projeto inovador: a criação de uma fresadora CNC de baixo custo com fins didáticos. Essa iniciativa busca integrar o

conhecimento teórico adquirido em sala de aula com a aplicação prática, possibilitando aos estudantes uma experiência direta com a tecnologia CNC. No entanto, a fresadora desenvolvida apresenta uma limitação: ela permite o uso por apenas um usuário de cada vez. Embora essa solução resolva parcialmente a questão da aplicação prática no ensino de CNC, o problema persiste para aqueles que não têm acesso direto à máquina, como é o caso em uma turma com múltiplos alunos. Dessa forma, enquanto alguns estudantes podem se beneficiar da experiência prática proporcionada pela fresadora, outros permanecem restritos ao aprendizado teórico, sem a oportunidade de interagir diretamente com o equipamento.

Para auxiliar na aprendizagem de CNC, Miranda (2009) desenvolveu em sua dissertação um programa denominado AutoCAM, que tem como objetivo auxiliar na aprendizagem de CNC através da geração automática do código G utilizado para controlar máquinas CNC. O AutoCAM gera esse código a partir de modelos visuais 3D criados em plataformas CAD (Computer-Aided Design) e valida a programação da peça apresentada, verificando se a máquina CNC será capaz de fabricá-la conforme o modelo.

Apesar de ser uma ferramenta útil para a geração de código G, o AutoCAM apresenta algumas limitações, a principal delas é que o programa não é capaz de ensinar efetivamente a linguagem de programação ao usuário, apenas fornece o código gerado automaticamente. Além disso, o AutoCAM é restrito a peças em 3D e não é capaz de gerar código para peças 2D ou operações mais complexas.

Weiqun Yang e Lihong Qiao (2010) desenvolveram um ambiente inteligente para treinamento de operadores de máquinas CNC, composto por módulos de simulação de usinagem e recursos de hipermídia. Esse sistema visa fornecer ao aprendiz um cenário virtual realista da operação da máquina, apoiado por um sistema especialista que oferece instruções e feedback em tempo real. O ambiente permite ao aprendiz visualizar a execução do programa CNC em seu simulador, contudo, o sistema não inclui recursos avançados de análise e correção de erros de programação, dessa forma, a ferramenta didática utilizada são textos e vídeos sobre o conteúdo geral de programação.

Abdulrasool et al. (2010) avaliam a eficácia do processo tradicional de ensino-aprendizagem comparado a dois modelos recentemente desenvolvidos de ensino híbrido em disciplinas de CAD, CAM e CNC. Os sistemas híbridos foram desenvolvidos integrando instruções assistidas por computador ao sistema tradicional de ensino. O estudo relata as visões de professores e alunos sobre vários aspectos do processo de ensino e aprendizagem em diferentes modos. Os modos híbridos tiveram maior aceitação pelos professores e alunos em comparação com o modo tradicional.

Tsai et al. (2012) investigaram os efeitos das características de realidade virtual, como riqueza de mídia e interatividade, na percepção de affordance (capacidade do meio de transmitir informações relevantes) de visibilidade e compatibilidade por parte dos estudantes. Eles propuseram um modelo teórico em que a riqueza de mídia e a interatividade influenciariam as affordances percebidas, que por sua vez afetariam a intenção de aprender a utilizar uma ferramenta de realidade virtual desenvolvida para auxiliar no ensino de operação de máquinas-ferramentas CNC. O modelo foi avaliado empiricamente por meio de uma pesquisa com 170 estudantes sobre suas percepções em relação ao simulador de máquina-ferramenta CNC desenvolvido, resultando numa forte influência positiva na intenção de aprender a utilizar o simulador virtual.

Alves et al. (2013) apresentam um estudo comparativo envolvendo alunos do curso de Engenharia Mecânica que utilizaram o software Win Train CNC, um programa de simulação e visualização gráfica do processo de usinagem, durante o curso de programação CNC. Os autores buscaram avaliar o desempenho de 19 alunos que utilizaram esse simulador, comparando-os com o mesmo número de alunos do ano anterior que não tiveram acesso a esse recurso ao desenvolver o mesmo conteúdo. Os resultados mostraram que o uso do simulador

gráfico proporcionou uma economia de tempo significativa, permitindo que conteúdos inicialmente não previstos, como conceitos de metrologia e qualidade, fossem incluídos na disciplina "Fabricação Assistida por Computador". Além disso, os autores identificaram outras vantagens, como maior atenção dos alunos às aulas, melhor aprendizagem dos conceitos apresentados e a possibilidade de explorar situações virtuais extremas que seriam difíceis de realizar em condições reais. Os autores concluem que o uso adequado de ferramentas computacionais como simuladores pode diversificar as estratégias de ensino e aperfeiçoar o aprendizado dos alunos.

Muthupalaniappan et al. (2014) aborda a importância do ensino de usinagem CNC para a indústria manufatureira moderna e a necessidade de tornar esse tipo de treinamento mais acessível e menos oneroso. Os autores desenvolveram um protótipo de torno CNC horizontal de dois eixos de baixo custo, utilizando componentes de prateleira, hardware de código aberto (Arduino) e software CNC em código G. O torno é capaz de realizar operações de torneamento básicas e pode ser controlado remotamente pela Internet através de uma plataforma de aprendizado baseada na web, a plataforma permite que usuários remotos (estudantes) enviem programas CNC pela Internet para operar o torno fisicamente localizado no laboratório. O usuário também pode visualizar o processo de usinagem em tempo real através de streaming de vídeo e receber feedback de áudio, proporcionando uma experiência de aprendizado realista e prática sem a necessidade de ter máquinas CNC de alto custo disponíveis localmente.

O uso de novas tecnologias tem auxiliado o ensino de CNC e o processo de manufatura, o software CAM (Computer-Aided Manufacturing) Edgcam pode ser usado para criar programas CNC dentro do processo educacional. O Edgcam é apresentado como um sistema CAM universal e acessível, adequado para fins didáticos devido à sua interface amigável e capacidade de gerar programas CNC relativamente simples, sem exigir conhecimento profundo do sistema. Botko et al. (2015) detalha o processo de criação de um programa CNC no Edgcam para a usinagem de uma peça, abrangendo desde a importação do modelo CAD até a simulação do processo de usinagem. São demonstradas operações básicas como desbaste, perfilamento 3D, furação e mandrilamento. Os autores destacam recursos importantes do software, como a otimização de trajetórias de ferramenta, detecção de colisão e estimativa de tempo de usinagem.

Caixeta (2016) apresenta um projeto e implementação de um simulador web de máquinas de comando numérico computadorizado (CNC), chamado "CNC Web Simulator". O objetivo principal foi desenvolver um simulador multiplataforma, acessível através de navegadores web em qualquer sistema operacional, incluindo dispositivos móveis, superando as limitações dos simuladores existentes que geralmente são exclusivos para Windows. O simulador permite a simulação de três tipos de máquinas CNC: tornos, fresadoras e impressoras 3D. Ele foi desenvolvido utilizando tecnologias web modernas, como HTML5, JavaScript e WebGL, explorando a capacidade de processamento paralelo das GPUs para obter renderização 3D eficiente.

O "CNC Web Simulator" possui uma interface gráfica amigável, projetada para facilitar o aprendizado de programação em código-G para máquinas CNC. Os resultados apresentados mostram boa qualidade de renderização 3D das peças usinadas/impressas e velocidade de simulação superior a muitos simuladores proprietários. O trabalho aborda os fundamentos teóricos, como computação gráfica, WebGL e código-G, além de detalhar a solução proposta, a organização do código e apresentar resultados comparativos com outros simuladores e peças reais usinadas/impressas. O código-fonte do simulador foi disponibilizado como código aberto no GitHub para acesso público. O "CNC Web Simulator" demonstrou ser uma ferramenta promissora para o ensino de programação CNC de forma multiplataforma e gratuita, a desvantagem da plataforma é a necessidade de um conhecimento prévio para uso do simulador, bem como a falta de recursos didáticos que auxiliem na aprendizagem de CNC.

Shivakumar et al. (2016) apresentam um plotter CNC de 3 eixos de baixo custo e código aberto, baseado em Python e Arduino, projetado especificamente para ser uma ferramenta educacional acessível para o ensino de conceitos de CNC para estudantes universitários. Codificado inteiramente em Python, uma linguagem fácil de compreender, o sistema permite que os alunos entendam o funcionamento da máquina e modifiquem o código para uso pessoal, além de facilitar o aprendizado dos métodos CAD/CAM sem a necessidade de um interpretador de código G. O artigo ressalta que o sistema pode ser implementado em plataformas embarcadas, tornando-o portátil e ainda mais adequado como ferramenta de aprendizado prática sobre automação de manufatura em instituições de ensino.

Güler e Yücedağ (2018) descreveram o desenvolvimento de um aplicativo de realidade aumentada (RA) para treinamento de manutenção e reparo de tornos CNC. O conteúdo foi desenvolvido para o módulo *CNC LATHE TEARS*, ministrado na área de Tecnologias de Máquinas, para ser operado em dispositivos móveis como smartphones e tablets. Inicialmente, um cenário de treinamento foi preparado para o desenvolvimento do aplicativo, e então um modelo 3D de um torno CNC foi modelado.

Prianto et al. (2019) desenvolveram um projeto de design e fabricação de uma mini fresadora CNC 3D baseada na Internet das Coisas (IoT) para ser utilizada como meio de aprendizagem. O objetivo era tornar os alunos não apenas habilidosos na operação da máquina, mas também desenvolver suas habilidades em design e programação de máquinas CNC. O projeto seguiu o modelo ADDIE (Análise, Design, Desenvolvimento, Implementação e Avaliação). Os autores projetaram e construíram o hardware e software do mini CNC, integrando tecnologia computacional moderna. Os resultados dos testes de linearidade mostraram que não havia diferença significativa entre o valor de configuração e o valor medido do desempenho da ferramenta, sendo capaz de realizar o processo de corte em madeira, fibra ou alumínio. Isso demonstrou que o mini CNC é adequado para ser usado como meio de aprendizagem. A implementação em sala de aula foi realizada no curso de manutenção e reparo de CNC, onde os alunos foram solicitados a identificar requisitos de materiais, organizar materiais, identificar processos de trabalho e testar a fabricação de um produto na forma de uma Placa de Circuito Impresso (PCB).

Kesler et al. (2020) apresentam um aplicativo de realidade virtual (RV) desenvolvido para ensinar os procedimentos básicos de operação de uma fresadora CNC Hermle C42U a estudantes de engenharia mecânica. O aplicativo permite que os alunos experimentem virtualmente o controle da máquina, incluindo movimentos dos eixos, troca de ferramentas e fixação de peças, sem os riscos e restrições logísticas associados ao uso da máquina real. Os autores destacam as vantagens da RV para a criação de ambientes de treinamento imersivos e personalizados, especialmente quando envolvem processos potencialmente perigosos ou caros. Uma avaliação com o grupo-alvo indicou boa usabilidade e percepção de ganhos de aprendizado com o aplicativo em comparação a aplicativos 3D sem RV.

Uma possibilidade para o ensino de CNC com menor custo é o desenvolvimento de um modelo acessível de fresadora CNC de três eixos. Gomes (2020) construiu duas versões da máquina: uma com estrutura de MDF e outra com perfis metálicos reutilizados. Componentes como guias lineares, motores de passo e drivers foram obtidos a partir de equipamentos descartados. O controle foi implementado com Arduino e softwares de código aberto, como o interpretador Grbl. Testes de repetibilidade de trajetória mostraram resultados aceitáveis para aplicações acadêmicas com a versão metálica, enquanto a estrutura de MDF apresentou deficiências. Gomes destaca o baixo custo alcançado, cerca de cinco vezes menor que máquinas similares no mercado, como um fator facilitador para a disseminação dessa tecnologia em escolas e universidades. Ele argumenta que uma fresadora CNC acessível pode incentivar a pesquisa, o desenvolvimento de projetos e o aprendizado prático de manufatura assistida por computador por estudantes. Embora não tenha a precisão de equipamentos industriais, o

modelo proposto demonstrou viabilidade para usinagem de materiais como madeira e possivelmente acrílico em ambientes educacionais.

Dos Santos et al. (2022) propõem a construção de um protótipo CNC (Comando Numérico Computadorizado) acessível e de baixo custo destinado à fabricação de placas de circuito impresso (PCI), apresentando em seu trabalho uma abordagem passo a passo para a construção do protótipo CNC, utilizando componentes e materiais acessíveis, como Arduino, CNC Shield, motores de passo e softwares de código aberto. Marinho et al. (2022) também desenvolveram uma máquina de comando numérico de baixo custo para auxílio nos métodos de ensino e aprendizagem na engenharia, apresentando o desenvolvimento de um módulo didático de máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado) Laser de baixo custo para auxiliar nos métodos de ensino e aprendizagem na engenharia, a pesquisa envolveu o uso de plataformas acadêmicas, a metodologia do Modelo V para desenvolvimento de produtos mecatrônicos, e a construção da máquina com componentes de baixo custo, como Arduino, CNC Shield e impressão 3D. Os resultados mostram a viabilidade da máquina como auxílio no emprego de metodologias ativas para uma aprendizagem centrada no aluno.

Dos Santos et al. (2023) desenvolveram uma máquina de manufatura híbrida robusta e de fácil manuseio, utilizando uma fresadora CNC adaptada e um conjunto extrusor em uma única estrutura mecânica. Essa estrutura é controlada por uma eletrônica embarcada de baixo custo com código aberto, e ambas as etapas de manufatura aditiva e subtrativa são gerenciadas por um único software de fatiamento 3D, a solução é voltada para um ambiente acadêmico e de ensino de engenharia. A máquina de manufatura híbrida combina manufatura aditiva (impressão 3D), subtrativa (fresagem CNC) e conformativa (conformação mecânica), podendo auxiliar no aprendizado dos conceitos relacionados à manufatura subtrativa e CNC. Em seu trabalho os autores ressaltam que "a máquina híbrida apresentada pode ser uma ótima ferramenta para tornar o aprendizado de conceitos de manufatura aditiva, subtrativa, conformativa e híbrida mais efetiva em cursos de engenharia" (Dos Santos et al., 2023).

4. CONCLUSÃO

O ensino de CNC (Comando Numérico Computadorizado) enfrenta desafios significativos, principalmente devido aos altos custos das máquinas envolvidas. Essa barreira financeira limita o acesso prático dos estudantes a esses equipamentos, impactando negativamente o processo de aprendizagem. Embora algumas soluções tenham sido propostas, como a construção de fresadoras CNC de baixo custo e o desenvolvimento de simuladores virtuais, ainda há uma necessidade por uma plataforma gratuita, inovadora e didática.

A revisão sistemática da literatura revelou deficiências específicas nos simuladores e plataformas existentes. Caixeta (2016), ao desenvolver o "CNC Web Simulator", reconheceu explicitamente que seu simulador, embora multiplataforma e acessível, "apresenta a desvantagem da necessidade de um conhecimento prévio para uso do simulador, bem como a falta de recursos didáticos que auxiliem na aprendizagem de CNC". Esta limitação também foi identificada no ambiente desenvolvido por Weiqun Yang e Lihong Qiao (2010), que "não inclui recursos avançados de análise e correção de erros de programação", utilizando apenas "textos e vídeos sobre o conteúdo geral de programação" como ferramentas didáticas.

O simulador de Min Jou (2005), embora pioneiro, limita-se a proporcionar "uma experiência semelhante à de um simulador, como um laboratório virtual de CNC", sem oferecer uma estrutura pedagógica integrada para guiar o aprendizado. De forma similar, Tsai et al. (2012) relataram que, apesar do impacto positivo de seu simulador na intenção de aprender, os estudantes enfrentaram dificuldades com "a percepção de *affordance* (capacidade do meio de transmitir informações relevantes) de visibilidade e compatibilidade", indicando problemas na interface e na comunicação de informações essenciais para o aprendizado.

Diante desse cenário de limitações claramente documentadas nos trabalhos analisados, este estudo propõe concretamente o desenvolvimento de uma plataforma didática de código aberto, acessível via web, especificamente projetada para ensinar programação em CNC. Esta não é apenas uma ideia teórica, mas um produto real a ser implementado como resultado direto desta pesquisa. A plataforma terá seu código disponibilizado de forma aberta, permitindo que outros pesquisadores e educadores possam adaptá-la, aprimorá-la e expandir suas funcionalidades em trabalhos futuros, potencializando seu impacto educacional. A necessidade de tal plataforma gratuita é evidenciada por Muthupalaniappan et al. (2014), que destacaram explicitamente em seus resultados "a importância de tornar esse tipo de treinamento mais acessível e menos oneroso" e desenvolveram uma plataforma web para operação remota de um torno CNC físico, demonstrando a viabilidade técnica desta abordagem. Alves et al. (2013) reforçam esta necessidade ao comprovar quantitativamente que "o uso do simulador gráfico proporcionou uma economia de tempo significativa" e promoveu "maior atenção dos alunos às aulas, melhor aprendizagem dos conceitos apresentados", evidenciando benefícios pedagógicos concretos de ferramentas virtuais bem projetadas.

Diferentemente dos simuladores existentes, a plataforma incorporará características pedagógicas ausentes nas soluções atuais, baseando-se diretamente nas lacunas identificadas na literatura revisada. Estas incluem: (1) uma abordagem gradual que introduz conceitos progressivamente, endereçando o problema identificado por Caixeta (2016) quanto à "necessidade de conhecimento prévio"; (2) tutoriais interativos com exemplos práticos e exercícios guiados, superando a limitação de simuladores que oferecem apenas "textos e vídeos sobre o conteúdo geral" (Yang e Qiao, 2010); (3) feedback imediato e detalhado sobre erros de programação, ausente nos "recursos avançados de análise e correção de erros" mencionados como limitação por Yang e Qiao (2010); e (4) um sistema de avaliação formativa que acompanha o progresso do aprendiz, abordando a lacuna metodológica identificada por Marinho et al. (2022).

Ao superar as barreiras de custo e acesso, e oferecer uma abordagem pedagógica sólida, essa nova plataforma pode representar um avanço significativo no ensino de CNC, democratizando o acesso a essa tecnologia e preparando melhor os futuros profissionais para os desafios da indústria moderna.

Portanto, a realização deste trabalho é recomendada, pois abordará uma lacuna existente e contribuirá para o aprimoramento do ensino de CNC, tornando-o mais acessível, prático e eficiente, beneficiando assim estudantes, instituições de ensino e, em última instância, o setor industrial como um todo.

REFERÊNCIAS

Abdulrasool, S., Mishra, R., Khalaf, H. (2010). Teachers' and Students' Attitudes Towards Traditional and Computer Assisted Blended Teaching and Learning Processes in Mechanical Engineering Subjects Area. 10th IEEE International Conference on Computer and Information Technology. 2010, Bradford, 1436-1441.

Alves, I. F., Schimiguel, J., de Araújo, M. S. T. (2013). Vantagens do uso de simuladores gráficos no curso de programação em CNC para alunos de engenharia mecânica. Revista de Ensino de Engenharia, 32(1).

Botko, F., Hatala, M., Kormoš, M., Ungureanu, N., Šoltés, P. (2015). Using Edgecam for creating CNC programs in education process. In: 2015 IEEE 13th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII), IEEE, 255-259.

Caixeta, F. A. (2016). PROJETO DE UM SIMULADOR DE MÁQUINAS CNC EM PLATAFORMA WEB, Engenharia de Controle e Automação, Universidade de Brasília Brasília, Brasília, 2016.



- Dos Santos, D. A., Fonseca, L. C. C., Pinto, M. S. S., Ribeiro, F. A. A. (2022). Protótipo CNC: um novo recurso para ambientes maker como apoio didático ao ensino/aprendizagem em cursos de Robótica Educacional. *Research, Society and Development*, 11(6), e40711629161-e40711629161.
- Dos Santos, J. P. A., Ota, J. I. Y., Macedo, P. D. P. L., Delmondes, R. D. C., Araújo, M. A. A. D. (2023). Soluções adaptadas de baixo custo para o desenvolvimento de máquina de manufatura híbrida. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 20.
- Gomes, J. C. (2020). Construção de fresadora de baixo custo controlada computacionalmente, para aplicações didáticas. *Revista Eixo*, 9(2), 13-26.
- Güler, O., Yücedağ, I. (2018). Developing an CNC lathe augmented reality application for industrial maintenance training. 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), IEEE, 1-6.
- Kesler, D., Arntz, A., Friedhoff, J., Eimler, S. C. (2020). Mill instructor: Teaching industrial cnc procedures using virtual reality. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR), IEEE, 231-234.
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, 33(2004), 1-26.
- Marinho, A., Pedrisch, R., Magalhães, J., Milena, A., Santos, A. V. A. (2022). Desenvolvimento de máquina de comando numérico de baixo custo para auxílio nos métodos de ensino e aprendizagem na engenharia. Congresso Brasileiro de Automática-CBA.
- Min Jou, H. Z. (2005). Development of an e-learning system for teaching machining technology. *International Conference on Active Media Technology, Kagawa*, 347-352.
- Min Jou, H. Z., C. L. (2005). Development of an interactive e-learning system to improve manufacturing technology education. *Fifth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, Kaohsiung*, 359-360.
- Miranda, R. J. C. D. (2009). Desenvolvimento De Um Programa Didático Computacional Destinado à Geração De Códigos De Comando Numérico a Partir De Modelos 3D Obtidos Em Plataforma CAD Considerando a Técnica Prototipagem Rápida [Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais], Engenharia Mecânica Belo Horizonte.
- Muthupalaniappan, N., Maruthupandi, A., Pandian, S., John Paul Antony, A., Shunmugham, R. (2014). A low-cost web-based learning platform for CNC machining education. 2014 Sixth International Conference on Advanced Computing (ICoAC), IEEE, 91-96.
- Prianto E. , Maryadi, T. H. T., Sunomo, S., Malik, C. (2019). Mini CNC Design to Increase Students' Programming and Control CNC Competencies. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing.
- Sanches, J. M. (2009). Desenvolvimento de uma fresadora CNC de baixo custo para fins didáticos [Dissertação, Universidade de São Paulo], Projeto Mecânico, São Carlos, 2009.
- Shivakumar, T., Sravan, M. S., Selvajyothi, K. (2016). Python based 3-Axis CNC plotter. 2016 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), IEEE, 823-827.
- Tsai, J., Kao, Y., Lee, R. (2012). Investigating the effect of virtual reality application on teaching assistance for machine tools operation education. 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 626-631.
- Yang, W., Qiao, L. (2010). Intelligent environment for CNC machine operator training. *International Conference On Computer Design and Applications*. 2010, Qinhuangdao, 399-403.