REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

CONTROLE NÚMERICO COMPUTADORIZADO PARA PLACAS DE CÍRCUITO IMPRESSO

COMPUTER NUMERICAL CONTROL FOR PRINTED CIRCUIT BOARDS

Jefferson Gomes Martins
Ciências da Computação, Unemat, Brasil
E-mail: jefferson.martins@unemat.br

Orientador: Professor Me. **Armando da Silva Filho**

Resumo

O Controle Numérico Computadorizado (CNC) tem se consolidado como uma tecnologia de precisão amplamente utilizada em processos de fabricação de peças complexas. No contexto da produção de placas de circuito impresso (PCBs), a precisão na usinagem é essencial, especialmente para componentes de montagem superficial (SMD) que exigem tolerâncias rigorosas. Este artigo descreve o desenvolvimento de uma máquina CNC de três eixos, projetada para usinar PCBs com alta precisão, visando atender às necessidades de prototipagem de baixo custo. A máquina é controlada por um sistema Arduino e utiliza softwares CAD e CAM para o controle da produção, integrando a linguagem G-code para garantir a precisão dos movimentos

Palavras-chave Controle Numérico Computadorizado (CNC), Placas de Circuito Impresso (PCBs), Precisão em Usinagem, Software de Fabricação (CAM, G-code)

Abstract

Computer Numerical Control (CNC) has established itself as a precision technology widely used in complex part manufacturing processes. In the context of printed circuit board (PCB) production, machining accuracy is essential, especially for surface mount components (SMD) that require tight tolerances. This paper describes the development of a three-axis CNC machine designed to machine PCBs with high precision, aiming to meet the needs of low-cost prototyping. The machine is controlled by an Arduino system and uses CAD and CAM software for production control, integrating G-code language to ensure movement accuracy.

Keywords: Computer Numerical Control (CNC), Printed Circuit Boards (PCBs), Machining Precision; Manufacturing Software (CAM, G-code).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

1. Introdução

A fabricação de placas de circuito impresso (PCBs) é um processo crítico na produção de dispositivos eletrônicos. Desenvolver uma máquina CNC de três eixos para essa finalidade oferece várias vantagens significativas.

Máquinas CNC são conhecidas por sua capacidade de operar com alta precisão e repetibilidade, essenciais na usinagem de PCBs, onde a exatidão das trilhas e furos é crucial, automatização do processo minimiza a possibilidade de erros humanos, melhorando a qualidade e a confiabilidade das placas.

Com uma máquina CNC, é possível produzir pequenas séries de PCBs personalizadas rapidamente, sem a necessidade de ferramentas específicas para cada design, o que é ideal para prototipagem e produção em pequena escala. É fundamental não apenas desenvolver a tecnologia, mas também demonstrar sua eficácia e praticidade, por várias razões como por exemplo: Testar a máquina em condições reais de operação assegura que ela funciona conforme o planejado e cumpre os requisitos técnicos. Comprovar a eficácia e a praticidade do sistema aumenta a confiança dos usuários potenciais, incentivando a adoção da tecnologia.

Através da comprovação prática, é possível demonstrar os benefícios reais, como a redução do tempo de produção e a melhora na qualidade dos produtos, facilitando a justificativa de investimento. O trabalho irá avaliar o desempenho de uma CNC de alta precisão na prototipagem do PCB, essa abordagem é ideal para aplicações que requerem alta precisão e repetibilidade, como usinagem de peças, prototipagem e outras operações de corte fino.

2. Revisão da Literatura

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

2.1 Controle Numérico Computadorizado (CNC)

O Controle Numérico Computadorizado (CNC) é um sistema que usa computadores para controlar o movimento de máquinas-ferramentas, eliminando a necessidade de intervenção manual. Desde sua invenção na década de 1950, o CNC tem evoluído, tornando-se um pilar essencial na fabricação moderna de peças de precisão. A principal vantagem do CNC sobre os sistemas manuais é sua capacidade de realizar movimentos complexos com alta precisão e repetibilidade (Marcicano, 2022).

A tecnologia CNC oferece inúmeras vantagens, como a precisão, repetibilidade e flexibilidade, sendo capaz de realizar cortes, perfurações, fresagens, gravações e outras operações de maneira automatizada. Para a produção de PCBs, o uso de CNC é essencial, pois permite a fabricação de trilhas e furos extremamente finos e precisos, necessários para os componentes SMD (Surface-Mount Devices). Isso é particularmente importante em designs modernos de placas de circuito impresso, onde as dimensões das trilhas e espessuras dos furos estão cada vez menores, exigindo máquinas com alta resolução e controle preciso.

2.2 Linguagem G-code

O G-code (ou código G) é a principal linguagem de programação utilizada para controlar máquinas CNC. Ele consiste em um conjunto de comandos que informam à máquina as coordenadas exatas para movimentar a ferramenta, a velocidade de avanço, a direção do movimento e outras operações de usinagem (Menezes, 2019, p. 35). A simplicidade da linguagem G-code permite que ela seja universalmente compatível com várias máquinas CNC, tornando-a uma das linguagens mais utilizadas em manufatura digital.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

2.3 Estrutura do G-code

Segundo (Tormach, 2024). G-code é estruturado em linhas de comando, cada uma representando uma ação específica da máquina. A estrutura básica de um comando G-code é a seguinte:

- G00: Movimento rápido (sem corte).
- G01: Movimento linear controlado, utilizado para corte.
- G02 e G03: Movimentos circulares no sentido horário e anti-horário, respectivamente.
- M03: Liga o spindle (ferramenta de corte).
- F: Define a taxa de avanço, ou seja, a velocidade com que a ferramenta se move enquanto corta.
- M05: Desliga o spindle.
- M30: Finalizar o programa.

O G-code é essencial para que a máquina CNC execute as operações de corte e usinagem de forma precisa, convertendo os dados do projeto (como os arquivos Gerber para PCBs) em movimentos físicos no equipamento.

2.4 Software CAD/CAM

Os softwares CAD (Computer-Aided Design) e CAM (Computer-Aided Manufacturing) desempenham papéis cruciais na criação e fabricação de produtos. O CAD é utilizado para desenhar os modelos e os CAM para gerar as instruções de usinagem a partir desses modelos. No contexto das PCBs, o CAD é utilizado para desenhar o circuito, enquanto o CAM converte esse design em G-code para a máquina CNC (Nadai et al., 2023).

2.5 Integração CAD/CAM

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

O CAD e o CAM frequentemente trabalham de forma integrada para otimizar o processo de produção. Ao projetar uma PCB, o engenheiro utiliza o software CAD para garantir que os componentes estejam corretamente posicionados e as trilhas de cobre estejam conectadas de acordo com o design eletrônico. Uma vez que o design está pronto, o software CAM converte esse desenho em código G, o qual é interpretado pela CNC para realizar os cortes e furos.

O Proteus, um dos principais programas CAD para circuitos eletrônicos, oferece ferramentas para tanto a simulação do circuito quanto a criação do layout da placa de circuito impresso (PCB) (Labcenter electronics, 2024). O software FlatCAM, por outro lado, atua como uma interface entre o design Gerber (formato usado para PCBs) e o código G necessário para a execução na máquina CNC (Flatcam, 2024).

3. Metodologia

3.1 Desenvolvimento do Protótipo CNC

O protótipo CNC foi desenvolvido para ser uma máquina de baixo custo, mas com alta precisão para a fabricação de PCBs. A construção foi dividida nas seguintes etapas:

1. **Escolha dos Materiais e Componentes**:
   - Estrutura: A base da máquina foi construída com metalon, devido à sua resistência e baixo custo. Os trilhos lineares foram instalados para permitir o movimento suave da mesa.
   - Motores de Passo: Os motores de passo nema17 foram escolhidos por sua alta precisão no controle de movimento, permitindo cortes de precisão em pequenos materiais.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

- Arduino: A plataforma Arduino foi escolhida para controlar os motores, devido ao seu baixo custo e fácil integração com sistemas CNC. O Arduino também oferece compatibilidade com diversas plataformas de código aberto, o que facilita a personalização do controle.
- Motor spindle é um motor corrente contínua 12000 rpm

2. Escolha dos Materiais e Componentes:

A base foi projetada para ser robusta (Figura 1), minimizando a possibilidade de vibrações que poderiam prejudicar a precisão da usinagem. Os motores de passo foram conectados a fusos de barra roscada 6 mm e guias lineares para os eixos X, Y e Z, proporcionando alta precisão e estabilidade. A mesa móvel foi construída com trilhos de gaveta, permitindo o movimento suave e preciso ao longo dos eixos.

Figura 1 - Router CNC



Fonte: O autor

3. Implementação do Controle e Programação

A programação do sistema foi feita utilizando a plataforma Arduino, que envia comandos de movimento para os motores, baseados no código G gerado pelo FlatCAM. O Universal G-code Sender foi utilizado para enviar o código G da máquina CNC, controlando os movimentos com precisão.

3.2 Testes de Precisão

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

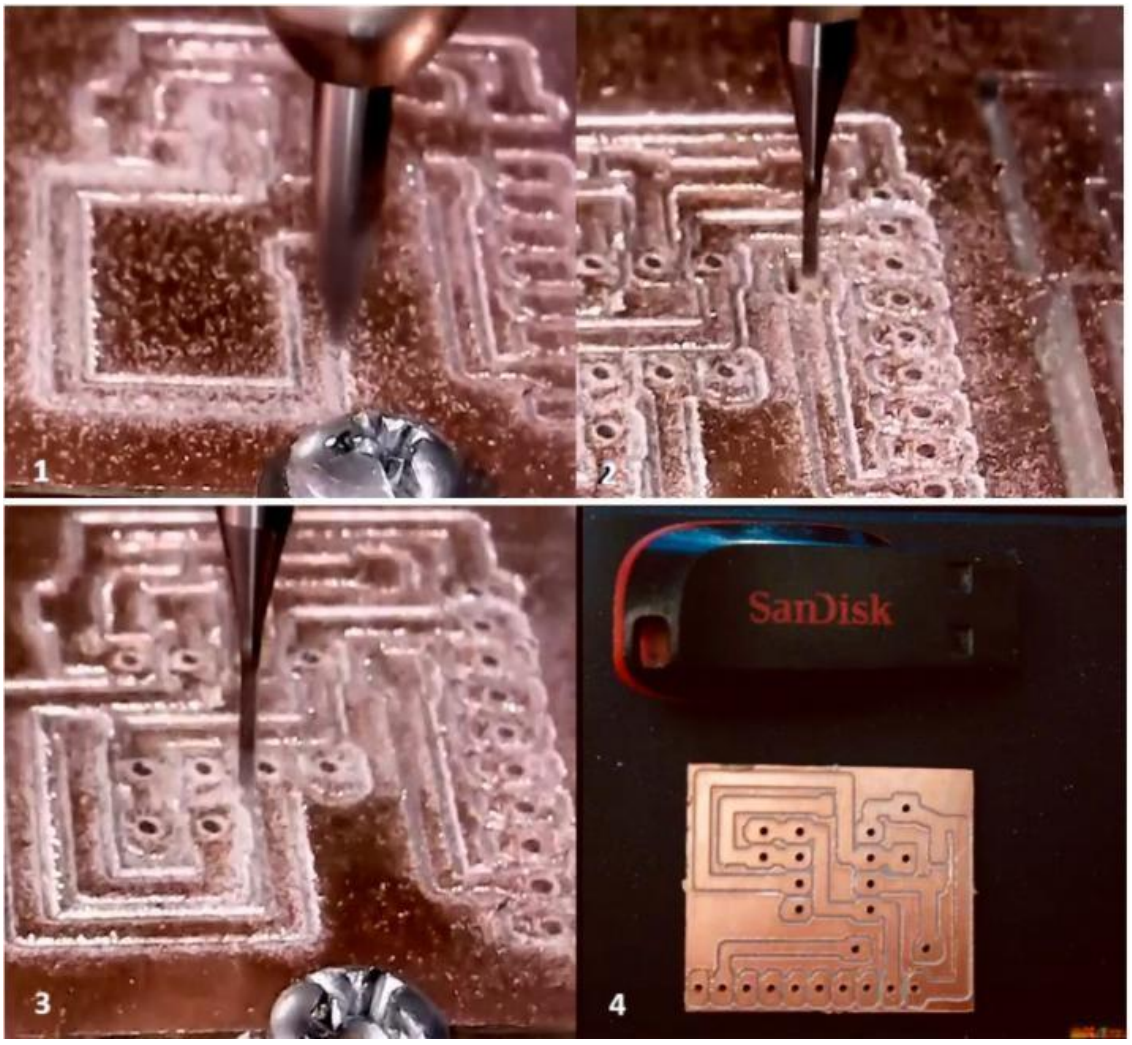
Foram realizados diversos testes de precisão para validar o desempenho da máquina.

Esses testes incluíram:

- Testes de Movimentos: Verificação dos deslocamentos dos eixos X, Y e Z com a utilização de um paquímetro digital para medir com precisão os movimentos e garantir que a máquina estivesse seguindo corretamente os comandos do G-code.

- Usinagem de PCBs: Realização de cortes e furos nas placas de circuito impresso para testar a precisão da máquina na produção de trilhas e furos necessários para a montagem de componentes SMD (Figura 2).

Figura 2- Usinagem de PCB



REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

Fonte: O autor

3.3 Testes de Precisão

Uma comparação com máquinas CNC comerciais foi realizada para avaliar o desempenho do protótipo em termos de custo-benefício. Embora o protótipo tenha apresentado limitações, como excursão limitada do eixo Z e menor capacidade de corte profundo, ele demonstrou ser uma alternativa viável para prototipagem e produção em pequena escala, especialmente considerando seu custo muito inferior às máquinas comerciais, conforme Tabela 1 e 2.

Tabela 1- Precisão dos Eixos CNC Baixo Custo

Eixo	Máxima Excursão (mm)	Precisão Esperada (mm)	Precisão Obtida (mm)
X	285	0.05	0.05
Y	280	0.05	0.05
Z	35	0.05	0.05

Fonte: O autor

Tabela 2- Precisão dos Eixos Bantam tools comercial

Teste	Comando Enviado (mm)	Valor Medido (mm)	Erro (%)
Teste de Deslocamento X	10	10	0
Teste de Deslocamento Y	15	15	0
Teste de Deslocamento Z	20	20	0

Fonte: O autor

4. Resultados e Discussão

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

4.1 Comparação Detalhada entre CNC Baixo Custo e CNC Bantam Tools Comercial

A comparação entre a máquina CNC de baixo custo desenvolvida neste projeto e a máquina CNC comercial da Bantam Tools revela diferenças significativas em termos de estrutura, precisão, custo, software e aplicações.
A CNC de baixo custo foi construída com estrutura metálica soldada, utilizando fusos de barra roscada comum para os movimentos lineares. Seu sistema de controle é baseado em Arduino e utiliza o firmware GRBL, com envio de comandos por meio de softwares livres como o Universal G-code Sender e o FlatCAM (Arduino.cc,2024; Flatcam, 2024). Essa configuração proporciona uma solução acessível, com alto potencial de customização e manutenção simplificada, sendo ideal para aplicações acadêmicas e prototipagem de PCBs (Nadai et al., 2023).

Por outro lado, a Bantam Tools Desktop CNC apresenta uma construção mais robusta, com estrutura de alumínio usinado e sistemas de movimentação baseados em fusos de esferas (Ball Screws), que oferecem maior precisão e menor folga mecânica (Bantam tools, 2025a). Além disso, conta com um spindle de até 28.000 RPM, o que permite a usinagem de materiais mais duros, como alumínio e latão, com acabamento de qualidade industrial (Bantam tools, 2025b). Outro diferencial é o software proprietário Bantam Tools, que oferece integração direta com o Autodesk Fusion 360, simplificando o processo de programação e usinagem (Herzberg, 2016).

Em relação à precisão, a máquina de baixo custo demonstrou alcançar até 0,05 mm de tolerância em testes práticos com PCBs, enquanto a Bantam Tools oferece precisão nominal de até 0,05 mm, com melhor repetibilidade e controle de aceleração (Marcicano, 2022). Contudo, o custo de aquisição da CNC comercial é aproximadamente 30 vezes superior, fato que pode inviabilizar sua adoção em

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

pequenos laboratórios ou para uso educacional (Openbuilds, 2024).

A Tabela 3 apresenta uma síntese comparativa entre os dois modelos.

Tabela 3 – Comparação Técnica entre CNC de Baixo Custo e Bantam Tools

Características	**CNC Baixo Custo**	**Bantam Tools Desktop CNC**
Custo Aproximado	R$ 1.000,00	R$ 30.000,00
Estrutura	Metálica soldada (metalon)	Alumínio usinado com carenagem fechada
Tipo de Transmissão	Fusos de barra roscada	Fusos de esferas
Precisão	Até 0,08 mm (testada até 0,05 mm)	Até 0,05 mm
Área útil de trabalho	200 × 300 mm	177 × 229 × 83 mm
Número de eixos	3 (X, Y, Z)	3 (X, Y, Z) com possibilidade de 4º eixo
Controle eletrônico	Arduino + GRBL	Sistema proprietário Bantam Tools
Software de controle	FlatCAM, Universal G-code Sender	Bantam Tools Software (integração Fusion 360)
Tipo de spindle	Motor DC 12.000 RPM	Spindle até 28.000 RPM com

REMUNOM
ISSN 2178-6925

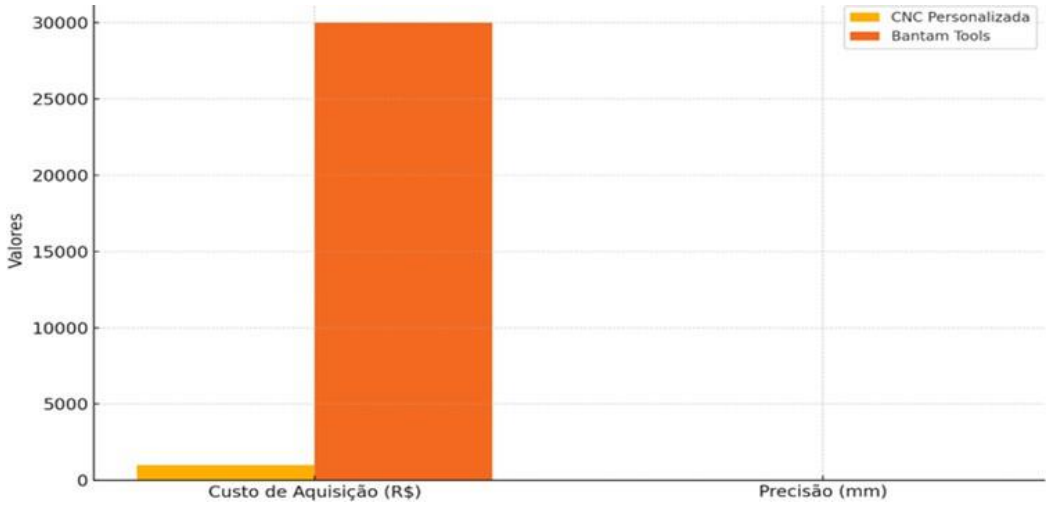
Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

		pinça ER-11
Tipos de materiais suportados	PCBs, plásticos leves, MDF	Alumínio, latão, plásticos, PCBs
Segurança operacional	Básica, sem enclausuramento	Alta, com sensores de porta e freio de emergência
Manutenção e customização	Fácil, peças comuns	Restrita a componentes do fabricante

Fonte: BANTAM TOOLS (2025a); BANTAM TOOLS (2025b); MARCICANO (2022).

Gráfico 1- Representação visual dos dados de custo de aquisição.

Grafico1-ComparativodeCusto



Fonte: BANTAM TOOLS (2025a); BANTAM TOOLS (2025b); MARCICANO (2022).

5. Conclusão

O desenvolvimento da máquina CNC de baixo custo demonstrou ser

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

tecnicamente viável e funcional para a prototipagem de placas de circuito impresso (PCBs), cumprindo os objetivos propostos. A integração de componentes acessíveis, como o Arduino, e softwares livres, como o FlatCAM, permitiu construir uma solução econômica com precisão suficiente para aplicações acadêmicas e laboratoriais.

Os testes demonstraram que a máquina alcançou precisão de até 0,05 mm, compatível com as exigências de montagem SMD em prototipagem, validando a eficácia do sistema de controle e da integração CAD/CAM. Embora apresente limitações em termos de robustez, profundidade de corte e interface de operação, seu custo reduzido — cerca de 30 vezes menor que uma CNC Bantam Tools — torna o projeto altamente vantajoso para instituições educacionais e makers.

Além disso, a comparação com uma CNC comercial evidenciou que, mesmo com recursos reduzidos, é possível alcançar resultados satisfatórios em ambientes de baixo orçamento. Este projeto reforça o potencial de soluções open-source e acessíveis na democratização da fabricação digital.

Como trabalhos futuros, sugere-se aprimorar o sistema mecânico com guias lineares de maior precisão, incorporar sensores de segurança e desenvolver uma interface de controle mais amigável. Também seria relevante explorar a usinagem de outros materiais e a implementação de um quarto eixo para ampliar a capacidade de fabricação.

Referências

ARDUINO.CC. Arduino Official Website. 2024. Disponível em: https://www.arduino.cc. Acesso em: 20 jun. 2025.

BANTAM TOOLS. Bantam Tools Explorer CNC Milling Machine. Peekskill: Bantam Tools, 2025b. Disponível em:

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

https://www.bantamtools.com/products/explorer-cnc-milling-machine. Acesso em: 21 jun. 2025.

BANTAM TOOLS. Desktop CNC Milling Machine. Peekskill: Bantam Tools, 2025a. Disponível em: https://www.bantamtools.com/products/desktop-cnc-milling-machine. Acesso em: 21 jun. 2025.

FLATCAM. FlatCAM: PCB Isolation Routing Software. 2024. Disponível em: http://flatcam.org. Acesso em: 21 jun. 2025.

HERTZBERG, B. Desktop CNC Machines: Building and Using Your Own Workshop Router.
1. ed. New York: Maker Media, 2016.

LABCENTER ELECTRONICS. Proteus Design Suite – Simulação e Layout de PCBs. 2024. Disponível em: https://www.labcenter.com. Acesso em: 20 jun. 2025.

MARCICANO, J. P. P. Introdução ao Controle Numérico. Universidade de São Paulo, 2022. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/cnc.pdf. Acesso em: 05 maio 2024.

MENEZES, N, N, C. Introdução à Programação com Python: Algoritmos e Lógica de Programação para Iniciantes. Edição 3. São Paulo: Novatec, 2019. Acesso em:17 jun. 2024.

NADAI, E. A. et al. A Importância das Aplicações CAD/CAM/CNC na Indústria. Hortolândia: Universidade Anhembi Morumbi, 2023.

OPENBUILDS. Introduction to CNC Machines. OpenBuilds, 2024. Disponível em: https://openbuilds.com. Acesso em: 20 jun. 2025.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 01/10/2025 - **Accepted:** 21/10/2025
Vol: 19.03
DOI: 10.61164/9bfsrf88
Pages: 1-13

TORMACH. Site do Tormach: Sobre a linguagem de programação G-code. 2024. Disponível em: https://tormach.com/about-g-code-programming-language. Acesso em: 16 jun. 2024.