



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PEDRO ALCANTARA DE SOUSA PENAFORTE

**CNC DE PEQUENO PORTE PARA DESENHO DE TRILHAS EM PLACA DE
CIRCUITO IMPRESSO COM CONTROLE DE ARDUINO**

PAU DOS FERROS

2025

PEDRO ALCANTARA DE SOUSA PENAFORTE

**CNC DE PEQUENO PORTE PARA DESENHO DE TRILHAS EM PLACA DE
CIRCUITO IMPRESSO COM CONTROLE DE ARDUINO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Petrucio Ricardo Tavares de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)

PAU DOS FERROS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P397c Penaforte, Pedro Alcantara de Sousa.
 CNC de pequeno porte para desenho de trilhas
 em placa de circuito impresso com controle de
 Arduino / Pedro Alcantara de Sousa Penaforte. -
 2025.
 30 f. : il.

 Orientador: Petrucio Ricardo Tavares de
 Medeiros.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de , 2025.

 1. CNC de pequeno porte. 2. Arduino. 3.
 Impressão 3d. 4. Automação. 5. Prototipagem. I.
 Medeiros, Petrucio Ricardo Tavares de, orient.
 II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

 Biblioteca Campus Pau dos Ferros
 Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
 CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PEDRO ALCANTARA DE SOUSA PENAFORTE

**CNC DE PEQUENO PORTE PARA DESENHO DE TRILHAS EM PLACA DE
CIRCUITO IMPRESSO COM CONTROLE DE ARDUINO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 22 / 12 / 2025

BANCA EXAMINADORA

Petrucio Ricardo Tavares de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Cecílio Martins de Sousa Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Sua dedicação, incentivo constante e confiança foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios enfrentados durante a graduação e alcançar a conclusão deste trabalho.

Agradeço também aos professores e orientadores que contribuíram para a minha formação, em especial ao meu orientador, pelas orientações, sugestões e acompanhamento durante o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Por fim, agradeço ao Botafogo de Futebol e Regatas, meu clube de coração, que mesmo nos momentos mais difíceis ensinou, na prática, o significado de persistência, resiliência e paixão — valores que, de certa forma, também estiveram presentes durante a construção deste trabalho.

RESUMO

As máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) desempenham um papel fundamental na indústria moderna, sendo amplamente utilizadas na fabricação de peças personalizadas e na prototipagem rápida. Entretanto, o alto custo de aquisição e manutenção dessas máquinas limita seu acesso em ambientes educacionais, laboratórios de pesquisa e pequenos empreendimentos, evidenciando a necessidade de soluções mais acessíveis. Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma máquina CNC de pequeno porte, voltada ao desenho de trilhas em placas de circuito impresso, utilizando a plataforma Arduino como sistema de controle. A metodologia adotada envolveu a fabricação da estrutura mecânica por meio de impressão 3D, a montagem do circuito eletrônico com motores de passo e drivers apropriados, a implementação do firmware GRBL e a integração de softwares para geração e execução de códigos G-code. Os resultados obtidos indicam que a CNC desenvolvida apresenta desempenho satisfatório em termos de precisão, repetibilidade e qualidade de acabamento para aplicações educacionais e experimentais, apesar das limitações inerentes aos componentes de baixo custo. Conclui-se que a máquina CNC proposta atende aos objetivos do trabalho, demonstrando viabilidade como ferramenta didática e de prototipagem, além de apresentar potencial para futuras melhorias estruturais e funcionais.

Palavras-chave: CNC de pequeno porte; arduino; impressão 3d; automação; prototipagem.

ABSTRACT

Computer Numerical Control (CNC) machines play a crucial role in modern industry, being widely used for customized manufacturing and rapid prototyping. However, the high acquisition and maintenance costs of such machines limit their availability in educational environments, research laboratories, and small enterprises, highlighting the need for more affordable alternatives. In this context, this work proposes the development of a small-scale CNC machine aimed at drawing circuit traces on printed circuit boards, using the Arduino platform as the control system. The adopted methodology involved the fabrication of the mechanical structure through 3D printing, the assembly of the electronic circuit using stepper motors and suitable drivers, the implementation of the GRBL firmware, and the integration of software tools for G-code generation and execution. The obtained results demonstrate that the developed CNC machine presents satisfactory performance in terms of precision, repeatability, and finishing quality for educational and experimental applications, despite the limitations associated with low-cost components. It is concluded that the proposed CNC machine meets the objectives of the work, proving to be a viable tool for teaching and prototyping purposes, with potential for future structural and functional improvements.

Keywords: small-scale CNC; arduino; 3d printing; automation; prototyping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visualização do modelo das peças 3D	17
Figura 2 – Impressão das peças na GTMax3D ProCore A2V2.	17
Figura 3 – Montagem mecânica da estrutura da CNC.	18
Figura 4 – Circuito utilizado para montagem eletrônica na protoboard com Arduino Uno e drivers ULN2003.	19
Figura 5 – Esquemático de ligações	19
Figura 6 – Fluxograma do processo de geração do G-code	20
Figura 7 – Foto da régua posicionada sobre o segmento desenhado	22
Figura 8 – Erro absoluto em função do deslocamento programado	23
Figura 9 – Foto da avaliação de precisão na placa de fenolite	24
Figura 10 – Foto aproximada mostrando o alinhamento das retas.	25
Figura 11 – Foto da avaliação de repetibilidade na placa de fenolite	26
Figura 12 – Circuito de 2mm e de 1mm	27
Figura 13 – Circuito de 2mm e de 1mm após desenho na Placa	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os trabalhos relacionados	14
Tabela 2 – Avaliação da precisão da CNC	22
Tabela 3 – Avaliação da precisão da CNC na placa de fenolite	24
Tabela 4 – Avaliação da repetibilidade da CNC	25
Tabela 5 – Avaliação da repetibilidade da CNC na placa de fenolite (30 mm)	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	TRABALHOS RELACIONADOS	12
2.1	Embasamento Teórico	12
2.2	Revisão da Literatura	13
2.3	Tabela Comparativa dos Trabalhos	14
3	METODOLOGIA	16
3.1	Modelagem das Peças	16
3.2	Impressão 3D	17
3.3	Montagem Mecânica	18
3.4	Montagem Eletrônica	18
3.5	Programação	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1	Metodologia de Avaliação da CNC	21
4.2	Avaliação da Precisão	21
4.3	Avaliação da Repetibilidade	25
4.4	Avaliação da Qualidade do Acabamento	27
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	29
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

As máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) desempenham um papel fundamental na manufatura moderna, permitindo a produção de peças com alta precisão, repetibilidade e automação. Essas tecnologias têm participação significativa em diversos setores industriais, incluindo a indústria automobilística, onde contribuem diretamente para a otimização de processos, redução de custos produtivos e aumento da eficiência operacional. A capacidade de fabricar componentes personalizados com maior rapidez tornou as CNCs elementos essenciais na cadeia produtiva contemporânea.

Apesar de sua relevância, o alto custo de aquisição e manutenção de máquinas CNC representa uma barreira significativa para pequenas empresas, instituições de ensino e laboratórios de pesquisa. No contexto acadêmico da UFERSA, por exemplo, a ausência de uma CNC no campus se deve justamente ao investimento necessário para obter e operar um equipamento desse porte, dificultando o desenvolvimento de atividades práticas relacionadas à prototipagem, automação e fabricação digital. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de alternativas acessíveis que permitam o aprendizado e a experimentação com essa tecnologia.

Nesse cenário, plataformas de hardware livre, como o Arduino, surgem como soluções viáveis para democratizar o acesso à automação e à eletrônica. Por ser de baixo custo, possuir ampla documentação e permitir integração com diversos componentes, o Arduino tem sido amplamente adotado em projetos educacionais e protótipos tecnológicos. Seu uso facilita o desenvolvimento de sistemas automatizados, possibilitando que estudantes explorem conceitos fundamentais de controle, motores, sensores e programação sem depender de equipamentos industriais caros.

Diante dessa realidade, o objetivo geral deste trabalho é projetar e implementar uma máquina CNC de pequeno porte utilizando a plataforma Arduino, capaz de realizar desenhos em placas para auxiliar na prototipagem de circuitos eletrônicos. Para alcançar esse objetivo, este estudo busca analisar o funcionamento de máquinas CNC, configurar o firmware GRBL, investigar o uso de motores e drivers compatíveis, integrar componentes mecânicos impressos em 3D, implementar a comunicação via G-code e avaliar experimentalmente o desempenho da máquina construída. Espera-se que a solução desenvolvida contribua para práticas de ensino, pesquisa e extensão, ampliando o acesso a tecnologias de automação e manufatura digital.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 1 são apresentadas a contextualização, a problemática, a justificativa e os objetivos gerais e específicos. O Capítulo 2

apresenta a revisão da literatura, contemplando o embasamento teórico, as tecnologias utilizadas e os trabalhos relacionados. No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos adotados no desenvolvimento do protótipo, incluindo hardware, software, modelagem mecânica e procedimentos de teste. O Capítulo 4 traz os resultados obtidos e a análise de desempenho da máquina CNC proposta. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo apresenta a revisão da literatura pertinente ao desenvolvimento de máquinas CNC de baixo custo aplicadas à automação e à prototipagem eletrônica. A seguir, são discutidos os fundamentos teóricos essenciais para compreender o funcionamento do sistema proposto e, em seguida, são analisados trabalhos relacionados que utilizaram (ARDUINO, 2024), motores de passo, GRBL e estruturas mecânicas simplificadas para construção de máquinas CNC acessíveis.

2.1 Embasamento Teórico

As máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) operam a partir da interpretação de comandos padronizados, conhecidos como *G-code*, que determinam os movimentos dos eixos X, Y e Z para execução de tarefas como corte, gravação, fresagem ou desenho. Esses comandos são decodificados por um firmware específico, sendo o GRBL um dos mais utilizados em projetos de baixo custo devido à sua compatibilidade com microcontroladores da família Arduino e à sua capacidade de controlar motores de passo com precisão.

O *Arduino UNO*, largamente empregado em CNCs compactas, é um microcontrolador de baixo custo que permite o controle direto de drivers de motor. Esses drivers atuam na comutação das bobinas internas dos motores de passo, possibilitando movimentos discretos e controlados, fundamentais para aplicações que exigem precisão. Motores de passo pequenos, como os 28BYJ-48 e os NEMA 17 em versões compactas, são comumente utilizados em protótipos devido ao seu baixo custo e disponibilidade.

A modelagem e produção de partes mecânicas por meio da impressão 3D contribuem para a popularização das CNCs acessíveis. Peças impressas em PLA permitem construir estruturas leves e rígidas com baixo investimento. Softwares de fatiamento transformam a geometria tridimensional em instruções adequadas para a impressora, garantindo que as peças atendam às dimensões necessárias para a movimentação dos eixos. Além disso, ferramentas como o (INKSCAPE, 2024) e o FlatCAM permitem converter imagens ou layouts de PCBs em caminhos vetoriais que posteriormente são transformados em *G-code*.

Assim, a combinação entre Arduino, GRBL, motores de passo, drivers acessíveis e estruturas impressas em 3D constitui a base tecnológica predominante em CNCs educativas e de baixo custo, as quais servem tanto como recurso pedagógico quanto como alternativa viável para prototipagem.

2.2 Revisão da Literatura

Diversos trabalhos têm investigado o desenvolvimento de máquinas CNC compactas e acessíveis, explorando diferentes abordagens de implementação eletrônica, mecânica e de software. Esses estudos demonstram a evolução das soluções de baixo custo e apontam direções importantes para o desenvolvimento do presente trabalho.

O estudo de (Chourasia; outros, 2018) apresentou uma CNC plotter baseada em Arduino capaz de realizar desenhos e contornos vetoriais utilizando motores de passo reaproveitados de unidades de DVD. O foco do trabalho está na acessibilidade, destacando a simplicidade de construção e o potencial educacional da plataforma. Embora a precisão seja limitada pela robustez da estrutura, o estudo demonstra a viabilidade de uma CNC funcional com componentes de baixo custo.

(Radake; outros, 2020) avançaram no desenvolvimento de uma CNC para fabricação de placas de circuito impresso (PCBs), implementando uma estrutura mecânica mais rígida e utilizando o firmware GRBL para controle dos eixos. O trabalho reforça a importância de estruturas mais robustas para aplicações que requerem precisão, como fresagem e perfuração de PCBs. Entretanto, o custo mais elevado da estrutura metálica pode ser um desafio para ambientes educacionais com recursos limitados.

O trabalho de (Faraj; outros, 2022) também abordou o uso de Arduino para construção de uma CNC para desenho de layouts de PCBs e imagens, utilizando motores de passo reaproveitados e peças impressas em 3D. A proposta destaca o caráter sustentável e acessível da utilização de motores recuperados, além de demonstrar bons resultados na reprodução de imagens vetoriais. No entanto, a fragilidade estrutural ainda se apresenta como limitação para maior precisão.

(Basheer; Abdulla, 2020) seguiram uma linha distinta ao desenvolver uma interface de controle em Visual Basic para uma CNC de três eixos. O foco do trabalho não está na parte mecânica, mas sim na criação de um sistema de controle mais amigável ao usuário. O estudo demonstra que interfaces personalizadas podem facilitar o uso de CNCs, embora a solução apresente maior complexidade de desenvolvimento quando comparada ao uso de firmware consolidado como o GRBL.

Por fim, (Mule; outros, 2024) apresentaram uma máquina CNC com fio quente (*hot wire cutter*) construída com Arduino e motores de passo. Embora voltada para corte de materiais leves, a proposta reforça a versatilidade do Arduino em aplicações CNC e demonstra que diferentes métodos de atuação podem ser integrados ao mesmo princípio de controle computacional.

A partir desses trabalhos, observa-se que a combinação de Arduino, motores de passo e estruturas de baixo custo constitui uma base consolidada para projetos CNC acessíveis. No entanto, os desafios relacionados à precisão mecânica, rigidez estrutural e usabilidade permanecem como limitações recorrentes. O presente trabalho busca contribuir para esse cenário ao implementar uma CNC de baixo custo voltada especificamente para desenho de circuitos, aplicando estratégias observadas na literatura e adaptando-as à realidade acadêmica.

2.3 Tabela Comparativa dos Trabalhos

A Tabela 1 apresenta uma síntese das principais características dos trabalhos analisados, permitindo uma visão clara das tecnologias empregadas, objetivos e limitações encontradas na literatura.

Tabela 1 – Comparação entre os trabalhos relacionados

Autores	Ano	MCU	Motor	3D	Edu.	Validação no Fenolite
Chourasia et al.	2018	Arduino Uno	28BYJ-48	Sim	Sim	Não
Radake et al.	2020	Arduino Uno	NEMA 17	Não	Não	Sim
Faraj et al.	2022	Arduino Uno	Reaproveitados	Sim	Sim	Parcial
Basheer & Abdulla	2020	Não esp.	NEMA 17	Não	Não	Não
Mule et al.	2024	Arduino Uno	Motor passo	Sim	Não	Não

Fonte: Autoria própria (2025).

A validação experimental dos trabalhos analisados apresentou abordagens distintas. O estudo de Chourasia et al. (2018) concentrou-se na verificação do funcionamento da CNC por meio de desenhos em papel, sem aplicação direta em placas de circuito impresso. Faraj et al. (2022) adotaram metodologia semelhante, avaliando a reprodução de imagens e layouts vetoriais, porém sem realizar testes em placas de fenolite. Basheer e Abdulla (2020) direcionaram seus esforços para o desenvolvimento do sistema de controle e interface de software, não contemplando validações físicas do processo de fabricação. O trabalho de Mule et al. (2024) aplicou o sistema CNC ao corte por fio quente, caracterizando uma validação distinta da proposta de fabricação de PCBs. Dentre os estudos analisados, apenas Radake et al. (2020) realizaram validação experimental diretamente em placas de fenolite, com foco na fresagem de trilhas e perfuração de PCBs, evidenciando a limitação da literatura quanto à validação prática desse tipo de aplicação em sistemas CNC de baixo custo.

A análise comparativa demonstra que, embora existam diversas abordagens para constru-

ção de CNCs de baixo custo, há espaço para soluções voltadas à prototipagem de PCBs com ênfase na simplicidade mecânica, baixo custo e facilidade de implementação. O presente trabalho se insere nesse contexto ao propor uma CNC para desenho de circuitos eletrônicos, alinhada às necessidades de ambientes educacionais e de pesquisa.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta detalhadamente os procedimentos adotados para o desenvolvimento da máquina CNC de pequeno porte proposta neste trabalho. O protótipo foi concebido utilizando componentes eletrônicos e mecânicos de fácil acesso e baixo valor comercial, resultando em um custo total aproximado inferior a R\$ 500,00, o que caracteriza a proposta como uma solução acessível quando comparada a máquinas CNC comerciais. As etapas do desenvolvimento foram organizadas em: modelagem das peças, redimensionamento e fatiamento, impressão 3D, montagem mecânica, montagem eletrônica, programação e testes. Cada uma dessas fases é descrita a seguir.

3.1 Modelagem das Peças

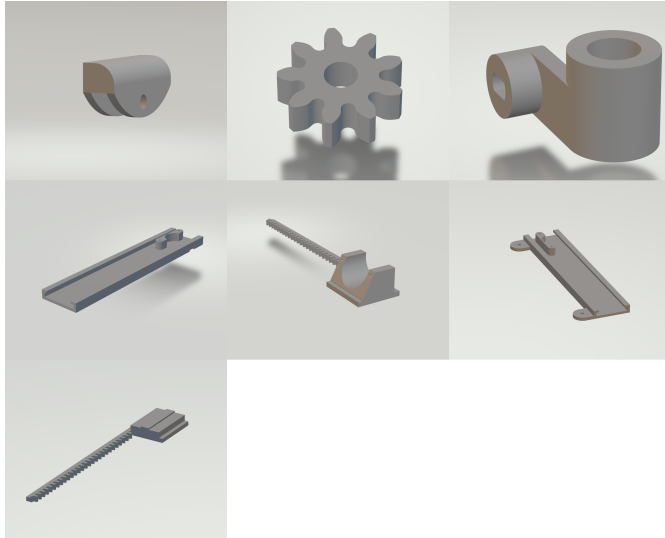
As peças utilizadas na construção da estrutura da CNC foram obtidas a partir de modelos tridimensionais disponibilizados em formato STL, incluindo suportes para motores de passo, estrutura base, guias lineares e componentes associados aos eixos X, Y e Z.

Após a obtenção dos modelos tridimensionais em formato STL, os arquivos foram submetidos ao processo de fatiamento, etapa responsável pela conversão do modelo geométrico em instruções compreensíveis pela impressora 3D. Esse procedimento foi realizado utilizando o software Ultimaker Cura, amplamente empregado em aplicações de prototipagem rápida e impressão 3D do tipo FDM.

Durante o fatiamento, os modelos foram analisados quanto à sua orientação na mesa de impressão e compatibilidade dimensional com a área útil do equipamento disponível, assegurando que todas as peças pudessem ser fabricadas sem a necessidade de modificações geométricas. Os parâmetros de impressão foram definidos de acordo com configurações padrão recomendadas para o uso de filamento PLA, priorizando estabilidade dimensional e integridade estrutural das peças, uma vez que estas desempenham função mecânica na estrutura da máquina CNC.

Ao final do processo, o software gerou os arquivos de controle necessários para a impressão das peças, os quais foram utilizados diretamente na etapa de fabricação, garantindo a correta deposição do material e a fidelidade das dimensões especificadas nos modelos originais.

Figura 1 – Visualização do modelo das peças 3D

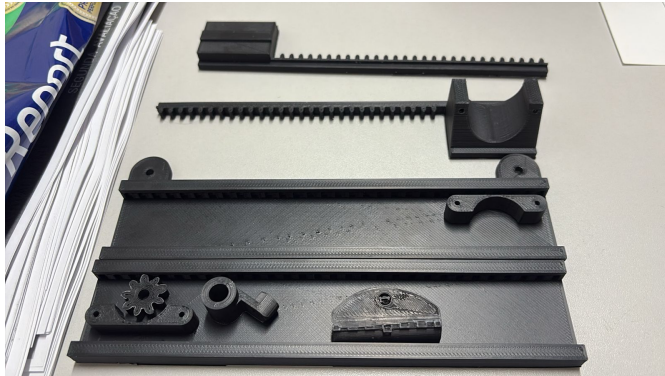


Fonte: <https://www.thingiverse.com/thing:4579436> (2025).

3.2 Impressão 3D

A impressão das peças foi realizada na impressora *GTMax3D ProCore A2V2*, utilizando filamento PLA de 1,75 mm de diâmetro. O fatiamento foi executado no *Ultimaker Cura*, com parâmetros definidos para garantir rigidez estrutural e boa precisão dimensional.

Figura 2 – Impressão das peças na GTMax3D ProCore A2V2.



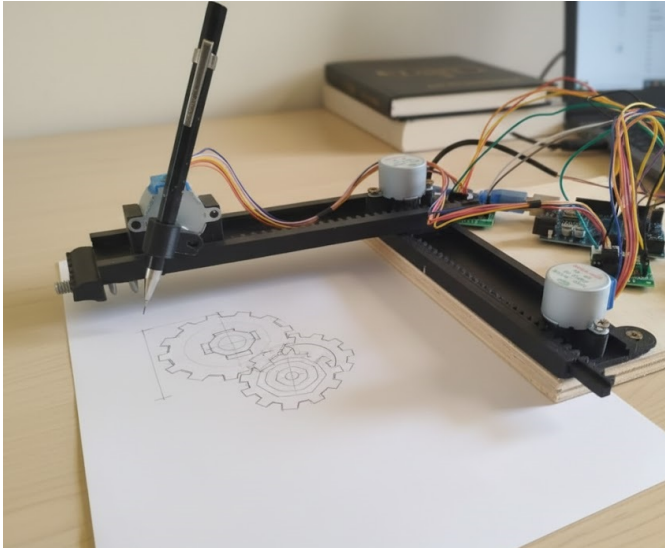
Fonte: Arquivo pessoal (2025).

3.3 Montagem Mecânica

Após a impressão, as peças foram organizadas e montadas de acordo com sua função estrutural. Os motores de passo 28BYJ-48 foram fixados diretamente nas peças impressas utilizando parafusos 3,5 mm × 16 mm, garantindo firmeza e alinhamento adequado durante o funcionamento. O eixo Z também recebeu um motor de passo 28BYJ-48 dedicado ao movimento rotacional, responsável pelo acionamento Rotacional do sistema.

A estrutura foi montada seguindo a configuração de três eixos cartesianos. O acoplamento das partes foi feito manualmente, garantindo alinhamento adequado para permitir movimentos suaves dos eixos.

Figura 3 – Montagem mecânica da estrutura da CNC.



Fonte: Arquivo pessoal (2025).

3.4 Montagem Eletrônica

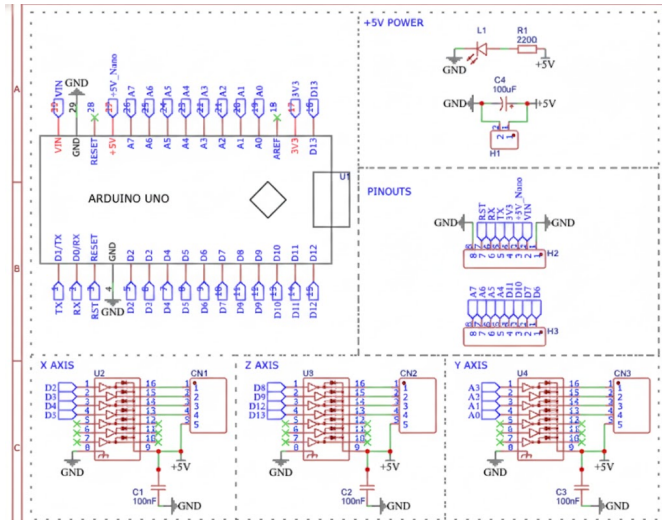
A etapa eletrônica envolveu a integração dos motores, drivers e microcontrolador. Foram utilizados os seguintes componentes:

- Arduino Uno;
- Drivers ULN2003;
- Motores de passo 28BYJ-48 (eixos X, Y e Z);
- Protoboard e jumpers;
- Fonte externa de 5 V e 2,25 A.

A ligação elétrica seguiu a pinagem recomendada para o acionamento dos motores

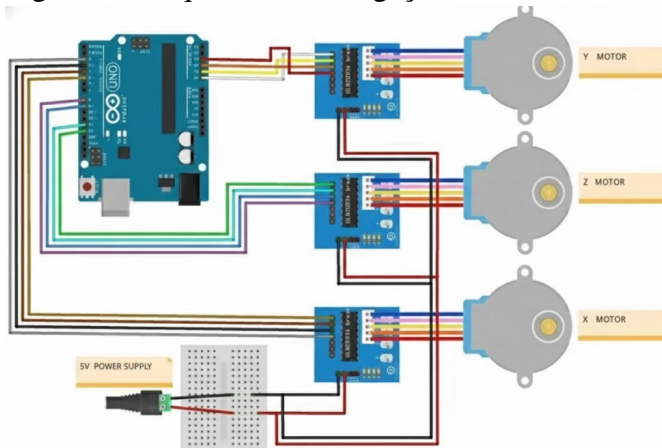
28BYJ-48 com o driver ULN2003. A fonte externa foi utilizada exclusivamente para alimentar os motores, enquanto o Arduino foi alimentado pela porta USB do computador. Todos os *grounds* foram conectados em comum para garantir referência elétrica consistente.

Figura 4 – Circuito utilizado para montagem eletrônica na protoboard com Arduino Uno e drivers ULN2003.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 5 – Esquemático de ligações



Fonte: Autoria própria (2025).

3.5 Programação

O controle da máquina CNC foi realizado por meio do firmware (GRBL, 2024) na versão v1.1h, responsável pela interpretação dos comandos em G-code e pelo controle sequencial dos motores de passo. O firmware foi carregado no Arduino Uno utilizando o *Arduino IDE*, versão

2.3.7. Após a inicialização, o GRBL permanece em escuta na interface de comunicação serial, aguardando o recebimento dos comandos enviados pelo computador.

O processo de geração do G-code inicia-se com a criação ou importação de uma imagem no software *Inkscape*. Caso a imagem esteja em formato bitmap, realiza-se a conversão para vetor utilizando a ferramenta de vetorização do próprio software. Em seguida, o desenho vetorial é redimensionado conforme a área útil de trabalho da máquina CNC, respeitando suas limitações físicas.

Após os ajustes geométricos, o vetor é selecionado e processado por meio de uma extensão específica para geração de G-code, onde são definidos parâmetros como velocidade de deslocamento e tipo de movimento. O arquivo G-code gerado é então salvo e enviado ao microcontrolador por meio de comunicação serial, sendo interpretado sequencialmente pelo firmware GRBL, que converte os comandos em sinais elétricos responsáveis pelo acionamento dos motores de passo nos eixos X, Y e Z.

Esse fluxo garante a correta conversão de um desenho bidimensional em movimentos físicos da máquina CNC.

Figura 6 – Fluxograma do processo de geração do G-code



Fonte: Autoria própria (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da avaliação experimental da máquina CNC desenvolvida neste trabalho. O objetivo principal é verificar o desempenho do protótipo quanto à sua capacidade de execução de movimentos controlados, considerando critérios de precisão, repetibilidade e qualidade do acabamento. Esses critérios permitem analisar se a CNC atende adequadamente às aplicações propostas, especialmente no contexto educacional e de prototipagem de circuitos eletrônicos.

4.1 Metodologia de Avaliação da CNC

A avaliação do desempenho da CNC foi realizada por meio de quatro métricas principais: precisão, repetibilidade e qualidade do acabamento. Cada métrica foi analisada a partir de experimentos práticos realizados com a máquina em funcionamento, utilizando desenhos previamente preparados em ambiente gráfico e convertidos para G-code.

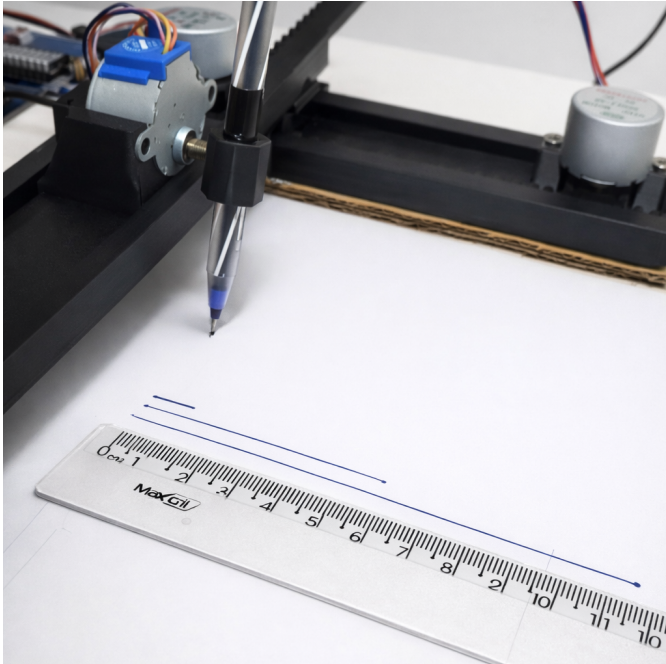
Os experimentos foram executados em ambiente controlado, utilizando régua graduada para medições lineares e observação visual direta para análise qualitativa do acabamento dos desenhos.

4.2 Avaliação da Precisão

A precisão da CNC foi avaliada a partir da execução de deslocamentos lineares previamente definidos. Para isso, foram criados segmentos de reta com comprimentos conhecidos partindo de 5mm e aumentando gradualmente sempre 5mm, utilizando o software Inkscape para geração do desenho vetorial. Posteriormente, o arquivo foi convertido para G-code e executado pela CNC.

Após a execução de cada segmento, o comprimento efetivamente obtido foi medido com o auxílio de uma régua graduada posicionada diretamente sobre o desenho realizado pela máquina.

Figura 7 – Foto da régua posicionada sobre o segmento desenhado



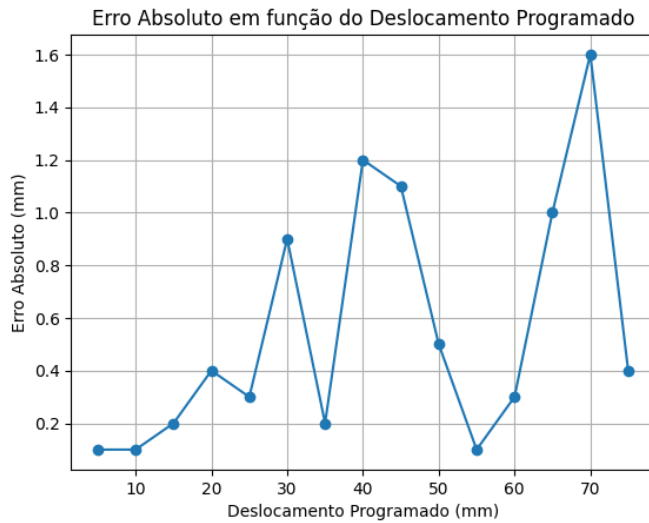
Fonte: Arquivo pessoal (2025).

Tabela 2 – Avaliação da precisão da CNC

Deslocamento Programado (mm)	Valor Medido (mm)	Erro Absoluto (mm)
5	5.1	0.1
10	9.9	0.1
15	14.8	0.2
20	20.4	0.4
25	25.3	0.3
30	30.9	0.9
35	34.8	0.2
40	41.2	1.2
45	46.1	1.1
50	50.5	0.5
55	55.1	0.1
60	60.3	0.3
65	66.0	1.0
70	71.6	1.6
75	75.4	0.4

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 8 – Erro absoluto em função do deslocamento programado



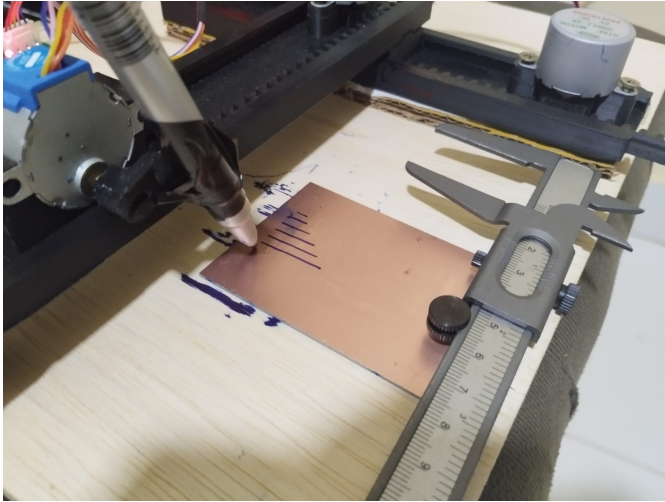
Fonte: Autoria própria (2025).

A Tabela 3 apresenta os valores de deslocamento programado, os valores medidos e o erro absoluto obtido em cada caso.

Além dos ensaios realizados sobre papel, a avaliação da precisão da máquina CNC também foi conduzida utilizando uma placa de fenolite, material comumente empregado na fabricação de placas de circuito impresso. Esse teste teve como objetivo verificar o comportamento da CNC em uma superfície mais rígida e próxima da aplicação final proposta neste trabalho.

Para essa etapa, foram programados deslocamentos lineares conhecidos, por meio da geração de trajetórias no software Inkscape e posterior conversão para G-code. A máquina foi então comandada a executar esses deslocamentos diretamente sobre a placa de fenolite, utilizando uma caneta acoplada ao eixo Z. Após a execução, os comprimentos resultantes foram medidos com o auxílio de paquímetro, permitindo a comparação entre os valores programados e os valores efetivamente obtidos.

Figura 9 – Foto da avaliação de precisão na placa de fenolite



Fonte: Arquivo pessoal (2025).

Tabela 3 – Avaliação da precisão da CNC na placa de fenolite

Deslocamento Programado (mm)	Valor Medido (mm)	Erro Absoluto (mm)
5	5.24	0.24
10	10.33	0.33
15	15.62	0.62
20	20.91	0.91
25	26.11	1.11
30	30.72	0.72

Fonte: Autoria própria (2025).

A partir dos resultados obtidos, observa-se que a CNC apresenta erros de pequena magnitude, compatíveis com sistemas de pequeno porte baseados em motores de passo 28BYJ-48. Os erros observados podem estar associados à resolução mecânica do motor, às folgas presentes no sistema de engrenagens, à rigidez estrutural das peças impressas em ácido polilático (PLA), que é um polímero biocompatível e biodegradável derivado de fontes naturais, e às limitações do método de medição manual com régua.

O erro máximo observado ocorreu em um dos maiores deslocamentos programados, o que é esperado, uma vez que pequenas imprecisões tendem a se acumular ao longo de percursos maiores. No entanto, a análise dos resultados indica que o comportamento do erro não é exponencial nem linear, apresentando-se de forma variável ao longo dos deslocamentos, o que sugere a influência de fatores mecânicos pontuais e condições específicas de operação, como vibrações, atritos e pequenas irregularidades no movimento dos eixos. Ainda assim, os valores obtidos demonstram que a CNC apresenta precisão suficiente para aplicações didáticas e para o

desenho de circuitos eletrônicos simples.

4.3 Avaliação da Repetibilidade

A repetibilidade da CNC foi avaliada por meio da execução repetida de um mesmo movimento linear. Para esse teste, foi solicitado à máquina que realizasse 30 vezes um segmento de reta com comprimento de 50 mm, sempre partindo da mesma posição inicial. Após cada execução, o comprimento final do segmento foi medido, permitindo verificar a capacidade da máquina de reproduzir consistentemente o mesmo movimento.

Tabela 4 – Avaliação da repetibilidade da CNC

Tentativas 1 a 10

Tent.	Medido (mm)
1	50.5
2	50.0
3	50.8
4	51.0
5	51.0
6	50.2
7	50.4
8	51.1
9	50.8
10	51.5

Tentativas 11 a 20

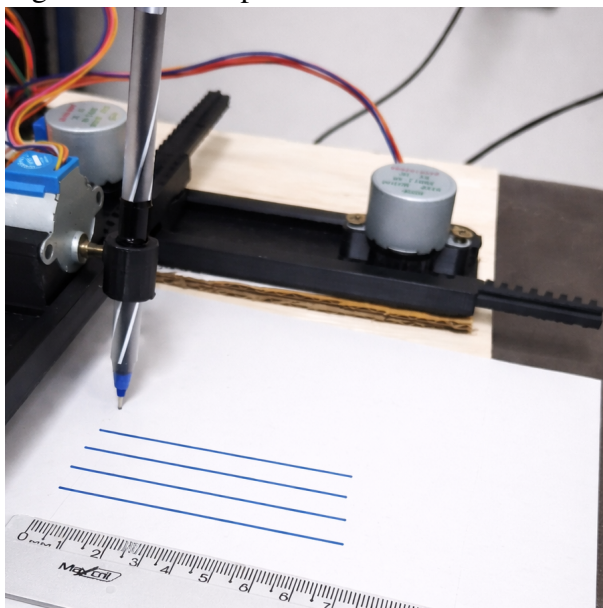
Tent.	Medido (mm)
11	51.1
12	50.7
13	49.7
14	51.0
15	50.2
16	50.1
17	50.6
18	51.2
19	49.8
20	49.8

Tentativas 21 a 30

Tent.	Medido (mm)
21	49.8
22	50.1
23	50.4
24	51.1
25	49.7
26	50.7
27	50.2
28	50.3
29	49.9
30	50.4

Fonte: Autoria própria (2025).

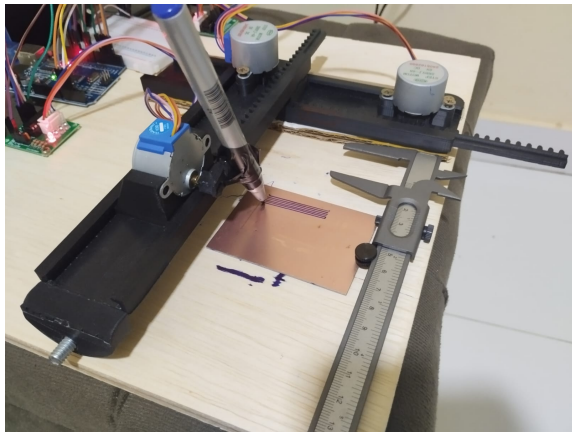
Figura 10 – Foto aproximada mostrando o alinhamento das retas.



Fonte: Arquivo pessoal (2025).

A repetibilidade da máquina CNC também foi avaliada sobre a placa de fenolite, considerando um deslocamento linear fixo de 30 mm, executado repetidamente a partir da mesma posição inicial. O objetivo desse ensaio foi verificar a capacidade da máquina em reproduzir consistentemente o mesmo movimento ao longo de múltiplas execuções consecutivas. Foram realizadas 15 tentativas, sendo que, após cada execução, o comprimento do segmento produzido foi medido com auxílio de um paquímetro, garantindo maior confiabilidade nas medições. Os valores obtidos permitem analisar a estabilidade do sistema mecânico e eletrônico, bem como possíveis variações associadas aos motores de passo, folgas mecânicas e alimentação elétrica.

Figura 11 – Foto da avaliação de repetibilidade na placa de fenolite



Fonte: Arquivo pessoal (2025).

Tabela 5 – Avaliação da repetibilidade da CNC na placa de fenolite (30 mm)

Tentativa	Comprimento Medido (mm)
1	30.61
2	30.58
3	30.64
4	30.60
5	30.57
6	30.63
7	30.59
8	30.62
9	30.56
10	30.65
11	30.60
12	30.58
13	30.63
14	30.61
15	30.59

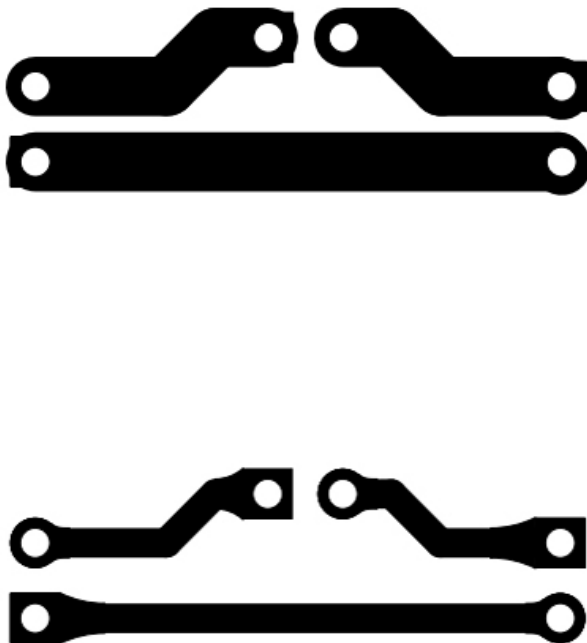
Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados indicam que a CNC apresenta boa capacidade de repetição para movimentos simples. Pequenas variações observadas podem estar relacionadas a vibrações mecânicas, elasticidade do filamento PLA, variações na alimentação elétrica e limitações inerentes aos motores de passo utilizados. Ainda assim, a repetibilidade obtida é satisfatória para o propósito educacional e experimental do projeto.

4.4 Avaliação da Qualidade do Acabamento

A qualidade do acabamento da máquina CNC foi avaliada usando um circuito com led, resistor e dois pontos para alimentação do circuito com trilhas de 1 e 2 mm (veja Figura 12) desenhada diretamente sobre uma placa de fenolite, utilizando uma caneta acoplada ao eixo Z. O desenho empregado apresenta trilhas retas e curvas, características que permitem observar o comportamento da máquina em trajetórias mais elaboradas, semelhantes às encontradas em layouts de placas de circuito impresso.

Figura 12 – Circuito de 2mm e de 1mm



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 13 – Circuito de 2mm e de 1mm após desenho na Placa



Fonte: Arquivo pessoal (2025).

A Figura 13 apresenta a comparação entre o desenho vetorial utilizado como referência e o resultado obtido pela CNC na placa de fenolite. A análise visual evidencia pequenas variações na uniformidade das linhas, bem como irregularidades pontuais nas extremidades e curvas, associadas principalmente a vibrações mecânicas, folgas nos mecanismos de transmissão e limitações inerentes aos motores de passo e à estrutura experimental utilizada.

Observou-se que, embora a CNC seja capaz de executar desenhos complexos, a qualidade do acabamento é influenciada por fatores mecânicos, como vibração da estrutura, estabilidade do eixo Z e posicionamento do pincel. Pequenas falhas pontuais, como traços indesejados ou variação na espessura da linha, são esperadas em sistemas de caráter educacional e não comprometem o objetivo principal do projeto.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a implementação de uma máquina CNC de pequeno porte com controle via Arduino, voltada para aplicações educacionais e para a prototipagem de circuitos eletrônicos. Ao longo do estudo, foi possível realizar a construção da estrutura mecânica utilizando peças impressas em 3D, a montagem do sistema eletrônico com motores de passo e drivers apropriados, bem como a configuração do firmware GRBL para o controle dos movimentos da máquina. Além disso, foram utilizados softwares de apoio para a conversão de desenhos em G-code, permitindo a execução de trajetórias bidimensionais pela CNC.

Os testes experimentais realizados permitiram avaliar o desempenho da máquina a partir de diferentes métricas, incluindo precisão, repetibilidade e qualidade do acabamento. Os resultados obtidos demonstraram que a CNC construída é capaz de executar deslocamentos controlados e reproduzir desenhos de forma consistente, apresentando comportamento adequado para fins educacionais. Apesar da presença de erros mensuráveis, o sistema mostrou-se funcional e coerente com as limitações esperadas de uma máquina CNC de pequeno porte e caráter educacional.

Entretanto, o trabalho também evidenciou algumas limitações importantes. A precisão e a repetibilidade apresentaram erros absolutos relativamente elevados quando comparados a máquinas CNC industriais, o que restringe a utilização do sistema em aplicações que demandam alta exatidão dimensional. Além disso, a área útil de trabalho da CNC mostrou-se limitada, restringindo o tamanho máximo dos desenhos e circuitos que podem ser produzidos. Essas limitações tornam o sistema menos adequado para a fabricação de peças complexas ou de grande escala, embora não comprometam sua aplicabilidade em ambientes acadêmicos e de aprendizagem prática.

Como trabalhos futuros, diversas melhorias podem ser propostas. Uma possibilidade consiste na substituição ou aprimoramento do sistema mecânico, com o uso de engrenagens e mecanismos de transmissão mais precisos, visando reduzir os erros de deslocamento. Outra proposta é a implementação de um sistema de armazenamento local, como um cartão SD, permitindo que o G-code seja executado diretamente pela máquina, eliminando a necessidade de manter um computador conectado durante a operação. Adicionalmente, a incorporação de módulos de comunicação sem fio, como Wi-Fi, possibilitaria o envio remoto dos comandos de controle. Por fim, futuras pesquisas podem explorar a otimização dos parâmetros de controle e a

adaptação do sistema para a execução direta de trilhas em placas de circuito impresso, ampliando ainda mais o potencial de aplicação da CNC desenvolvida.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO. **Arduino Uno Rev3**. 2024. Disponível em: <https://www.arduino.cc>. Acesso em: 2025.
- BASHEER, M.; ABDULLA, A. Cnc software control system using visual basic. **International Journal of Computer Applications**, 2020.
- CHOURASIA, A.; OUTROS. Low cost cnc plotter using arduino. **International Journal of Engineering Research and Technology**, 2018.
- FARAJ, A.; OUTROS. Cnc machine for image and pcb layout drawing. **International Journal of Advanced Research in Engineering**, 2022.
- GRBL. **GRBL Firmware**. 2024. Disponível em: <https://github.com/gnea/grbl>. Acesso em: 2025.
- INKSCAPE. **Inkscape — Vector Graphics Editor**. 2024. Disponível em: <https://inkscape.org>. Acesso em: 2025.
- MULE, S.; OUTROS. Arduino cnc hot wire cutter. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, 2024.
- RADAKE, P.; OUTROS. Design and fabrication of 3 axis cnc pcb. **International Journal of Scientific Research in Engineering and Management**, 2020.