

DESENVOLVIMENTO DE CNC DIDÁTICA PARA MANUFATURA SUBTRATIVA E ADITIVA USANDO PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Miguel Eduardo Gutierrez Paredes

Gabriel Lyra Chaves

Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, DF

miguel.gutierrez@unb.br, gabriel.lyra@unb.br

Resumo: As máquinas de comando numérico computadorizado (CNC) desde sua invenção até hoje são ferramentas presentes em muitos ambientes de fabricação incluindo o contexto da indústria 4.0. CNCs em geral têm custos elevados o que é uma barreira para uso didático, onde a fabricação de peças e protótipos é feita em menor quantidade. Nesse contexto, no curso de graduação em Design da Universidade de Brasília são dadas algumas matérias que usam modelagem 3D e prototipagem rápida. Sendo assim foi proposto o desenvolvimento de um protótipo de CNC didática multifunção. Consequentemente, pretende-se que os alunos tenham acesso a esta tecnologia por meio de um dispositivo que atenda às necessidades básicas de fabricação, tendo um custo menor do que máquinas encontradas no mercado. Além disso, pretendesse que o projeto que está ainda em desenvolvimento seja aberto e ao mesmo tempo use programas de controle open-source, isto pensado para facilitar sua difusão em ambientes universitários, incentivando a pesquisa e o desenvolvimento de outras propostas baseadas em prototipagem rápida. Finalmente, este texto descreve o processo desenvolvimento e evolução do projeto com foco principal na reprodutibilidade da iniciativa, atravessando também discussões de relevância para estruturação da proposta, como indústria 4.0, prototipagem digital e conteúdo aberto, tudo para aplicações didáticas onde o aluno tem contato direto com este tipo de tecnologia.

Palavras-chave: CNC didática, design de produto, prototipagem rápida, tecnologia aberta

1. INTRODUÇÃO

O setor industrial desempenha um papel vital no desenvolvimento econômico do país e, para isso, a inclusão de ferramentas e/ou equipamentos em ambiente universitário é, além de desejável, necessária. Nesse contexto, um dos conceitos recentes dentro do âmbito da fabricação é o da Indústria 4.0, onde o objetivo é tornar os sistemas de produção mais flexíveis e colaborativos (Santos et al., 2018).

Enquanto as três primeiras revoluções industriais teriam implementado a mecanização, as novas fontes de energia e o uso da tecnologia da informação, a quarta revolução seria caracterizada pelo uso de sistemas ciberfísicos, capazes de um grau gradativamente mais elevado de autogestão, e pela internet das coisas (ou *Internet of Things* ou IoT), que permitiria uma constante troca de informação entre os atores envolvidos na cadeia produtiva, sendo estes, majoritariamente, aparatos digitais (Qin et al., 2016). Gerar familiaridade e experiências concretas com esta nova forma de organização produtiva é um dos objetivos e desafios dos ambientes universitários, sendo entendido como um fator crucial na empregabilidade dos egressos ao longo das próximas décadas.

Um dos gargalos enfrentados no planejamento e execução de atividades educacionais desta natureza é o custo dos equipamentos, muitas vezes incompatível com questões orçamentárias. O investimento elevado resulta em dificuldade de acesso, tornando-se uma restrição a ser superada, problema sobre o qual se debruçam esta iniciativa e seu relato de desenvolvimento. Superar o alto custo do equipamento, desenvolvendo uma CNC para aplicações didáticas torna-se, portanto, o objetivo desta pesquisa. As dimensões educacionais desta experiência atravessam tanto a compreensão do funcionamento de equipamentos desta natureza e seu domínio técnico, quanto o desenvolvimento de competências projetuais características dos contextos de prototipagem e fabricação digital, podendo atender a diferentes direcionamentos pedagógicos.

Exemplos de iniciativas como a *RepRap* (Buback et al, 2022), que propõe a criação de impressoras autorreplicantes – capazes de imprimir as peças plásticas das quais são compostas – apontam caminho viável à superação do problema enfrentado, e licenças abertas, como a GPL (*GNU Public License*) (Free Software Foundation, 2022) garantem liberdade para uso, estudo, compartilhamento e modificação de projetos, desde que sejam preservadas as mesmas características de licença nas cópias e derivações. Este conjunto de princípios permite a criação e o fortalecimento de uma comunidade voltada ao desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos, recursos e programas, onde os benefícios são descentralizados e de natureza pública.

Nesta pesquisa, a adoção do processo de desenvolvimento e dos resultados sob a forma de recursos educacionais abertos (REA, também conhecidos como *open educational resources* ou OER) busca se alinhar às recomendações da

UNESCO para a execução do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 4, voltado para a educação de qualidade, permitindo sua reprodutibilidade.

Em termos de metodologia, nas etapas de pesquisa e desenvolvimento desta CNC didática, foram adotados ciclos iterativos de projeto, implementação, teste e ajuste, todos relacionados à prototipagem e fabricação digital da mesma. A cada ciclo, foram identificados problemas ou possibilidades de melhoria, incorporados no ciclo seguinte. No presente momento, o projeto encontra-se no sétimo ciclo iterativo, possuindo características funcionais descritas a seguir.

2. CNC's e usos educacionais

Resgatando as leis de aprendizagem de Ludwig von Bertalanffy, Gildo Montenegro lembra que, para uma aprendizagem efetiva, é preciso partir de experiências concretas para, só então, criar abstrações conceituais. Estas permitem novas percepções e organizações do campo experiencial, que geram novas abstrações, em um potencial relação recursiva (Montenegro, 2005). Essa observação possui grande relação com as propostas aqui desenvolvidas, tanto no que se refere à criação de uma CNC multifuncional de baixo custo, quanto em sua aplicação em atividades educacionais.

Rique Nitzsche define o design como ação de tornar tangível uma intenção de transformação. Este campo de atuação busca aplicar a intencionalidade e recorre a uma tradição metodológica – tanto formal quanto informal – para sair de uma condição presente rumo a outra preferível (Nitzsche, 2013). Neste processo, o termo ‘tangível’ merece particular destaque. Para além de tornar tátil, palpável, o ato de registrar ideias em qualquer meio, seja físico (e.g. livro, quadro negro etc.), seja digital (e.g. arquivos, redes de compartilhamento etc.) é igualmente compreendido como ‘tangibilizar’, uma vez que este registro permite que signos, conceitos e processos sejam manipulados, tais quais objetos físicos. A primeira forma da tangibilização, esta que torna algo palpável, contribui bastante com as etapas de verificação e ajuste de um projeto. Realizar testes com protótipos físicos enriquece e amplifica a qualidade do produto final, fomentando o desenvolvimento de competências basilares na formação de projetistas/designers. Para além disso, a manipulação compartilhada de projetos, onde o desenvolvimento da solução fica descentralizado entre uma ou mais equipes, promove experiências muito relacionadas ao contexto da Indústria 4.0 e suas especificidades.

Segundo a UNESCO, recursos educacionais abertos são “materiais de aprendizagem, ensino e pesquisa desenvolvidos em qualquer formato ou meio, que residem no domínio público ou sob *copyright* que foi liberado sob uma licença aberta, e que permitem acesso gratuito, reuso, reestruturação de propósito, adaptação e redistribuição por outros” (UNESCO, 2019)¹. A adoção dos REA fomenta a produção e a circulação de soluções entre atores de diferentes instituições, e mesmo entre países, potencializando a melhoria de atividades educacionais. Se considerarmos que mesmo o projeto da CNC didática está sujeito a versões e aprimoramentos, uma vez que se constitui em um REA, percebemos que esta iniciativa permite criar experiências e desenvolver competências mais elevadas, como a manipulação e o aprimoramento da própria solução, habilitando aqueles que mais se identificam com o conteúdo e desenvolvem curvas de aprendizagem mais acentuadas a experimentar em situações de maior complexidade. Este evento se coloca na categoria das situações preferíveis, uma vez que esperamos que o equipamento, seu uso e aprimoramento concretizem uma cultura de uso entre o Laboratório de Prototipagem Digital (PROTIP) e o corpo discente da graduação e, eventualmente, da pós-graduação, assim como resultem na publicação do projeto e de seus resultados em congressos, eventos e na própria web.

Abrigada pelo curso de Bacharelado em Design da Universidade de Brasília, esta iniciativa tem sido aplicada em duas disciplinas: *Desenho Aplicado 2*, obrigatória para os bacharelados em Programação Visual e Projeto de Produto, e *Projeto de Produto 2*, obrigatória apenas para o segundo bacharelado. Nos dois casos, temos o desenvolvimento de soluções individuais e coletivas, ambos considerando a modelagem tridimensional, simulação de aplicações e a fabricação digital através da CNC didática como parte integrante de seus programas de ensino. Ao longo destas aplicações, são trabalhadas competências como implementação, quando os requisitos de cada tecnologia de impressão precisam ser considerados do desenvolvimento à fabricação digital, além do trabalho com versões, que permite manter um histórico de experiências projetuais e mapear os diferentes caminhos que o desenvolvimento de uma solução tomou ao longo do tempo.

3. DESENVOLVIMENTO

Desde que as máquinas CNC foram desenvolvidas, a indústria as tem usado nas mais diferentes funções, desde impressora 3D, torno CNC, fresadora CNC, máquinas de medição por coordenadas, entre outros (Alonso et al., 2015; Polastrini, 2016).

Uma principal característica das máquinas CNC é que possuem eixos mecânicos movimentados comumente por motores de passo, diferenciando-se exclusivamente no tipo de função. Dependendo desta última, o equipamento pode ter

¹ No original, “*Open Educational Resources (OER) are learning, teaching and research materials in any format and medium that reside in the public domain or are under copyright that have been released under an open license, that permit no-cost access, re-use, re-purpose, adaptation and redistribution by others.*”

diferentes conjuntos de eixos, por exemplo: uma máquina de gravação a laser geralmente possui dois eixos (X e Y), máquinas de usinagem tipo *Router* geralmente possuem três eixos (X, Y e Z) e máquinas tipo impressora 3D para tecnologia aditiva FDM possuem também geralmente três eixos mais um quarto motor que movimenta o filamento que vai para a extrusora (Acuña et al., 2013).

Além dos diferentes mecanismos dos equipamentos descritos anteriormente, outro componente essencial é o sistema de controle da máquina, que é feito através do uso de tecnologia de comando numérico ou mais comumente conhecido como código G.

Estas duas partes, hardware e software, constituem o acervo que necessariamente se deve conhecer e manusear para utilizar o equipamento de forma adequada, seja na academia ou na indústria.

A fim de detalhar as principais diferenças entre as três máquinas que compõem o desenvolvimento do dispositivo aqui apresentado, serão descritos a seguir a função e os componentes que diferenciam cada estrutura.

3.1. Máquina de gravação a laser CNC

A principal função de uma máquina CNC Laser de baixo custo é gravar e/ou cortar matérias macios (e.g. madeira, tela, EVA, papel etc.)(Paulos, 2014). Por outro lado, este tipo de máquina CNC se diferencia dos mencionados anteriormente pois usa como ferramenta de gravação/corte um sistema baseado em diodo laser de baixa potência.

Nesse contexto, diversos tipos de laser poderiam ser escolhidos para o presente desenvolvimento. Pesquisas conduziram à escolha do Módulo Laser Diodo 40W por estar mais próximo do requerido numa máquina didática.

A Tabela 1 apresenta as características desse módulo e a Figura 1 a sua geometria.

Tabela 1- Características módulo laser

Caraterística	Valor
Material	Alumínio
Potência do laser	40W com output de 10W
Cor da luz	azul-violeta
Comprimento de onda	405 nm
Tensão de entrada	12VDC
Modo de acionamento	PWM
Modo de resfriamento	Resfriamento por ar
Distância focal	4 cm

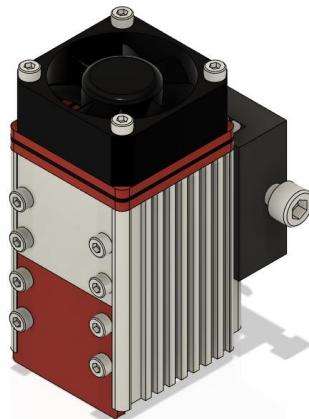


Figura 1. Módulo laser. Autores

3.2. Máquina de usinagem CNC

A principal função de uma máquina CNC de usinagem (ou simplesmente máquina CNC) de baixo custo é usar ferramentas de corte (fresas, brocas entre outros) de alta velocidade para subtrair material de uma peça bruta (madeira, metais ferrosos e não ferrosos, entre outros) com o intuito de criar um componente/produto. Normalmente as máquinas CNC incluem fresadoras de 3, 4 e 5 eixos, mas no contexto deste trabalho a máquina de baixo custo em desenvolvimento possui apenas 3.

As máquinas CNC variam em como cortam a peça bruta: (i) a peça pode permanecer no lugar enquanto a ferramenta de corte se move; (ii) a ferramenta pode permanecer no lugar enquanto a peça se move; ou (iii) a ferramenta de corte e a

peça podem se mover juntas. Para a máquina aqui apresentada, a peça bruta fica fixa na mesa de corte enquanto a ferramenta de corte se move e faz a subtração do material.

Agora, a principal diferencia desta máquina com as nomeadas anteriormente é o *spindle*/motor que comporta a ferramenta de corte. Este componente rotaciona a ferramenta de corte a diferentes velocidades a depender do tipo de material e do acabamento final do componente usinado.

Neste contexto, existem diversos tipos de *spindles* para inúmeras aplicações e capacidades, porém, para o presente desenvolvimento foi escolhido um motor de capacidade reduzida de acordo com o contexto de uma máquina didática de baixo porte (Acuña et al., 2013; Alonso et al., 2015; Polistrini, 2016).

Idealmente, a máquina vai ser usada para usinar metais não ferrosos (e.g. alumínio e latão) e materiais de baixa densidade como madeira, sabão, EVA, MDF entre outros semelhantes. Este tipo de requerimentos de usinagem se traduz na necessidade de um *spindle* com as características da Tabela 2. Na Figura 2 apresentamos a sua geometria.

Tabela 2- Características do *Spindle*

Caraterística	Valor
Tipo	Motor 775
Material	Liga
Diâmetro do eixo	5 mm
Comprimento do eixo	14 mm
Diâmetro do corpo	42 mm
Comprimento total do motor	67 mm
Velocidade	20.000/min
Corrente nominal	1.5A
Tensão de alimentação	12VDC



Figura 2. *Spindle* com mandril de perto. Autores

3.3. Máquina CNC de Impressão 3D

Geralmente uma máquina de Impressão Aditiva 3D (ou simplesmente impressora 3D) tem como objetivo usar material de diversos tipos em forma de filamento (e.g. plástico de composições diversas como Poliacido Láctico ou comumente conhecido como PLA, ou ainda o Acrilonitrila Butadieno Estireno comumente conhecido como ABS).

O material é derretido por um sistema de aquecimento e depositado em camadas/fatias, com o intuito de compor um objeto de diferentes complexidades (Martin et al., 2014). Nesse contexto, as principais diferenças desta máquina com as anteriormente apresentadas são: o sistema de extrusão (neste projeto, de tipo direto²) e aquecimento do filamento (*hotend*) e uma mesa/cama aquecida, onde o material é depositado. O aquecimento da mesa visa evitar que a peça que está sendo imprimida se descole da mesa durante o processo de impressão.

Partindo das diferenças é possível identificar os componentes necessários para a implementação da funcionalidade de impressão 3D. Assim, consequentemente e diante de várias análises dos componentes requeridos, foram escolhidas as peças (extrusor, *hotend* e mesa aquecida) da máquina didática proposta para compor os mecanismos e funcionalidades da impressora 3D.

² Nos sistemas de extrusão direta, a extrusora e a *hotend* formam um único elemento, minimizando a distância entre o ponto de tração e o bico. Informações disponíveis em < <https://filament2print.com/> >, acesso em 21 ago. 2022.

Para o extrusor e *hotend* foi escolhido o kit extrusor direto MK8, usado nas impressoras Prusa i3 MKS3, por ser muito robusto, ter suporte na comunidade de impressão 3D e por ser de fácil instalação e manutenção. Nesse contexto, A - Características do kit extrusor direto MK8Tabela 3 apresenta as características deste kit e a Figura 3 mostra a sua geometria.

Tabela 3- Características do kit extrusor direto MK8

Caraterística	Valor
Tipo	Kit (Extrusor - <i>Hotend</i>)
Material	Alumínio – ABS
Modelo	42HS40-1704-13 ^a
Tensao de operação	12VDC
Corrente DC	1.7A
Ângulo de passo	1.8°
Torque estático	4.2Kg.cm
Peso do motor	0.32Kg
Diâmetro do eixo	5mm
Comprimento do eixo	24mm
Dimensões	25 x 100 x 68 mm
Tamanho do bico	0,4mm
Cartucho aquecedor	12V/40W
Sensor térmico	Termistor XH2.54
Motor de passo	Nema17
Ventoinha	5012 turbo

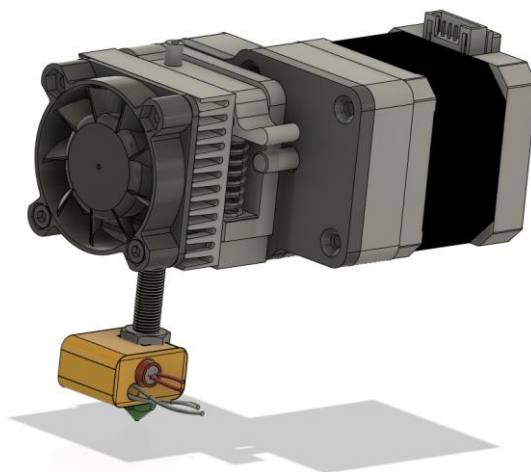


Figura 3. Kit Extrusor *Hotend* Prusa MK8, Autores

Baseado nos módulos antes descritos nas diferenças de cada máquina CNC e levando em consideração que uma máquina CNC didática é de pequeno porte, é desenvolvido a seguinte estrutura mecânica.

3.4. Desenvolvimento da máquina CNC didática

Como descrito pelos autores Alonso et al., Oltean et al. e Polastrini (Alonso et al., 2015; Oltean, 2017; Polastrini, 2016), máquinas CNC didáticas possuem diversas funcionalidades e aplicações. No entanto, no contexto do presente artigo, uma máquina didática CNC está sendo desenvolvida para possuir três funcionalidades básicas, sendo elas: gravura a laser, usinagem CNC e impressão 3D, tudo isto visando aplicações dentro do contexto da prototipagem rápida e o ensino de projeto e desenvolvimento de produtos dentro do ambiente do Design.

Para o desenvolvimento/simulação da estrutura mecânica é utilizado a suíte CAD de simulação Fusion 360 versao educativa (Autodesk.com, 2022) da Autodesk. Nele foi projetada uma sequência de versões iteradas da máquina, onde melhorias foram implementas a cada revisão.

A seguir é apresentada a versão atual do desenvolvimento tanto de hardware quanto de software da máquina CNC didática proposta.

2.4.1 Hardware da máquina CNC didática

O protótipo da estrutura mecânica da máquina foi dividido por eixos (X, Y e Z) e funcionalidades, visando uma área de aproximadamente 20cm de comprimento, 20cm de largura e 10cm de altura, suficiente para aplicações didáticas.

Para gravura temos o módulo acoplado no cabeçote da máquina, o qual herda a fixação com o eixo X. Isto permite que de forma relativamente rápida seja intercambiável por um outro módulo, seja ele o do *Spindle* ou do kit extrusor/*hotend* para impressão 3D.

Com relação a movimentação dos eixos, motores de passo (referência NEMA23 de 9Kg.cm) são utilizados por serem relativamente baratos e de fácil controle de acordo com as características do baixo custo. Associados a estes, estão os drivers (TB67S109AFTG), que permitem controlar a direção do giro do motor e a quantidade de passos/movimento do eixo, além de tensão/corrente de alimentação e operação.

Por outro lado, levando em consideração que o cabeçote do equipamento deve comportar os diferentes módulos antes descritos, foi desenvolvido um sistema que permite intercambiar e colocar nele um módulo por vez.

Conhecendo as geometrias, medidas e limitações que a máquina irá possuir, uma primeira versão foi desenvolvida para atingir as necessidades do projeto sem esquecer o conceito de baixo custo.

Depois de várias iterações onde cada uma trazia melhorias e adicionava requisitos, chegou-se numa versão quase final da estrutura mecânica da máquina, como evidenciado na Figura 4.

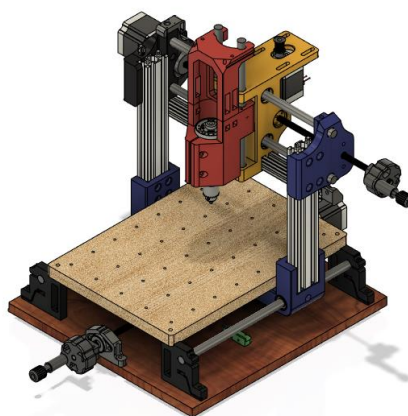


Figura 4. Sétima versão do desenvolvimento da Máquina CNC didática com o módulo *Spindle*. Autores

Por outro lado, além dos drivers e componentes eletrônicos, é implementada a interface de controle entre os driver e o computador. Nela são carregadas e transferidas as informações de movimentação via USB e comandos em código G (Gomes, 2020).

A interface de controle possui uma parte do hardware a qual usa a placa de desenvolvimento *BluePill*, que é composta por um microcontrolador STM32F103C8T6 funcionando a 72MHz. Nesta placa é carregada/executada uma versão do firmware para máquinas de 3 eixos que inclui aplicações laser e usinagem conhecido como GRBL (JimVrsCNC, 2022). Por outro lado, para implementar a funcionalidade da impressão 3D será usada a placa de desenvolvimento Arduino Mega que possui um microcontrolador ATMEGA2550. Esta funcionalidade ainda encontrasse em desenvolvimento pois esta placa possui muito mais entradas e saídas quando comparado com o *BluePill*, possibilitando conectar e controlar mais componentes eletrônicos periféricos que uma impressora 3D requer.

De forma a evidenciar os materiais empregados na estrutura e os componentes eletromecânicos, compilamos as informações na Tabela 4.

Tabela 4. Materiais usados no hardware do equipamento em desenvolvimento

Componente	Descrição	Qtd
Base madeira	Base da máquina onde são fixados todos os componentes.	1
Peças impressas em 3D	Peças com geometrias diversas para fixar: eixos, mancais, guias lineares, rolamentos lineares, rolamentos, chaves fim de curso, parafusos/porcas, motores, e módulos laser, <i>Spindle</i> e kit impressora 3D.	15
Guias lineares	Guias de metal cilíndricas de Ø12 mm. Diversos tamanhos.	6
Rolamentos lineares	Ref LM12UU. Rolamentos que desliza pelas guias lineares para transferência de movimento.	12

Fuso trapezoidal com castanhas anti-folga	Ref TR8 350-KP-AC-SP com passo de 8mm para os eixos X e Y, e passo de 2mm para o eixo Z. Diversos tamanhos.	3
Parafusos	Diversos tamanhos, porém, em diâmetros de M3, M4 e M5. Sempre tentando padronizar segundo o local a fixar.	100
Rolamentos	Ref 628 C3 – Ctk. Usados junto aos fusos para apoiar.	3
Motores/Drivers	Motor Ref Nema23 10Kgf.cm. Driver Ref TB67S109AFTG	3
Sistema de polias	Polia correia 10mm Gt2 20 40 Dentes Redução 2:1 F40-8	1
Mancal	KFL08 com rolamento para eixo de Ø 8mm	3
Chave fim de curso	Ref KW11-3Z-5. Usados para calibrar a máquina. Limites dos eixos.	3
Fonte de alimentação	Fonte Chaveada Estabilizada Bivolt tipo Colmeia 24V 30A	1
Regulador de tensão	Módulo Abaixador Tensão Ajustável DC-DC (LM2596)	1
Microcontrolador	Placa de Desenvolvimento STM32F103C8T6 Arm Stm32	1
Perfil de alumínio	Perfil Estrutural V-slot 20x20 e 20x40. Diversos tamanhos	4

2.4.1 Esquema de conexões elétricas da máquina CNC didática

A fim de representar as conexões feitas entre os vários componentes que permitem o controle dos eixos e a comunicação com o software CAM, é realizado um esquema simbólico como mostrado na Figura 5. Além destas conexões foi desenvolvida uma Placa de circuito Impressa (PCI) que facilita a implementação das ligações entre o microcontrolador, os drivers e as chaves fim de curso (ver o link do projeto https://oshwlab.com/meduag_1707/stm32_grbl).

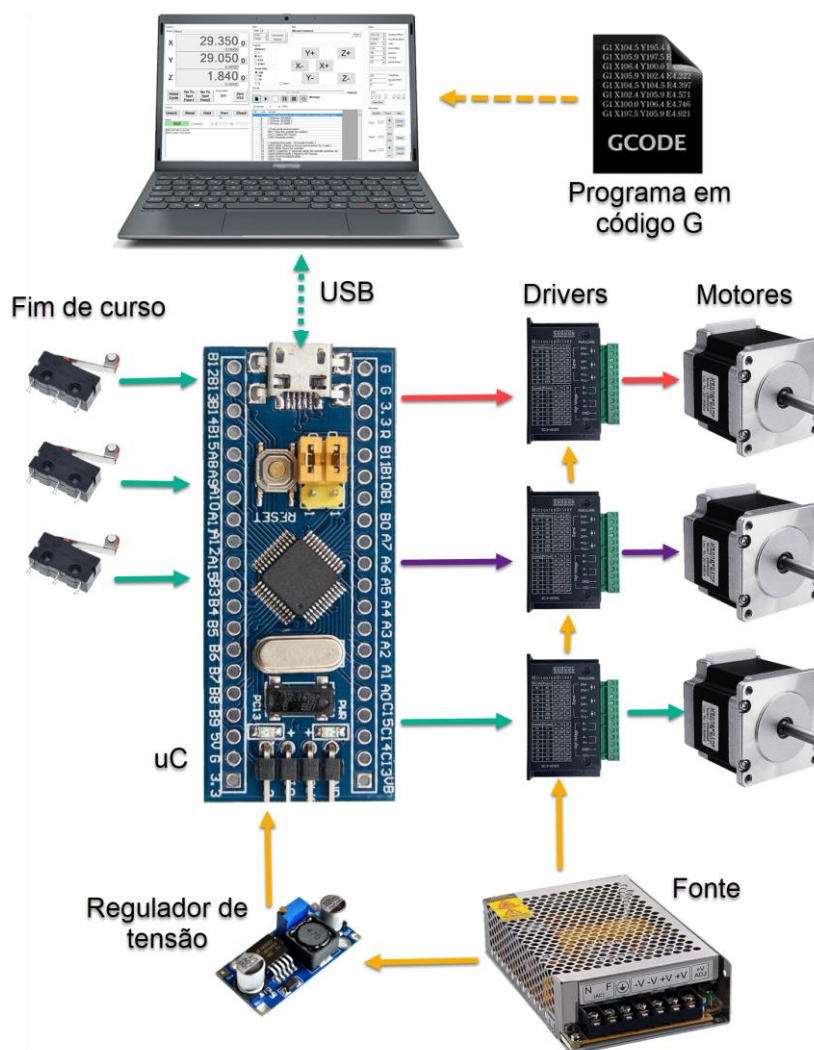


Figura 5. Esquema simbólico de conexões da máquina. Autores

2.4.1 Software de controle da máquina CNC didática

Máquinas CNC funcionam principalmente com um set de instruções/comandos chamados de códigos G ou G-CODE, além de funções acessórias chamadas código M (código *miscellaneous*). O código G poderia ser identificado como instruções que indicam a movimentação dos eixos da máquina em forma de coordenadas XYZ, ativação/desativação entre outras características junto com o código M.

No contexto do desenvolvimento da máquina didática foi utilizado firmware chamado GRBL. GRBL foi projetado para interpretar o código G. Este firmware foi desenvolvido para atender às necessidades dos fabricantes industriais, levando em consideração uma linguagem padronizada em sistemas de controle numérico computadorizado (CNC). Sua principal função é posicionar as máquinas nas coordenadas X, Y e Z com precisão, velocidade e repetibilidade, tornando-se a linguagem padrão para tais controles (JimVrsCNC, 2022).

A versão de GRBL usada é chamada pela comunidade como GRBL32 V1.1 de 3 eixos e seu repositório pode ser achado no link: <https://github.com/pvico/grbl32>.

Por outro lado, além de interpretar de G-CODE é necessário utilizar um software no computador que encaminhe os códigos G para o BluePill via USB. Para isto foi utilizado o software CAM: Universal G-CODE Sender ou UGS (Will Winder, 2022). Neste programa é possível realizar diversas configurações da máquina, além de carregar programas para usinagem, laser e até impressão 3D.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como proposto, este relato de pesquisa se bifurca em duas vertentes: uma pedagógica, outra técnica. Em ambas, a viabilidade da iniciativa foi verificada. Sobre a experiência e seus possíveis desdobramentos, convém fazer algumas observações.

Os preceitos do RepRap, inicialmente voltados à popularização e à redução de custos na produção de impressoras 3D de diferentes naturezas, tiveram nesta pesquisa um realinhamento de propósito. Para além da potencialidade de popularizar o acesso, o exercício de criar e aprimorar as diferentes versões deste equipamento pode ser considerado um ato que transcende a dimensão técnica e que adentra no campo pedagógico. Neste aspecto, as características de reprodutibilidade, reuso, adaptação e redistribuição, vinculadas aos recursos educacionais abertos, são preservados e permitem o alinhamento da proposta com os objetivos sustentáveis preconizados pela UNESCO. A cada ciclo de impressão, análise, aprimoramento e implementação, as dimensões técnica e pedagógica da iniciativa se retroalimentam, melhorando o equipamento e expandindo o conhecimento e a experiência daqueles envolvidos com a iniciativa.

As especificações da versão atual do equipamento, compartilhadas neste relato, destinam-se a garantir reprodutibilidade, reuso e adaptação e podem ser consultadas no link: https://github.com/meduag/MULTICNC_didatica. Por este motivo, procuramos ser tão descritivos quanto possível. Esperamos contribuir para a produção de equipamentos desta natureza, visto que seu uso em contextos educacionais se torna cada vez mais necessário. Desta maneira, o projeto se ajusta tanto às necessidades crescentes de contato com equipamentos de fabricação e prototipagem digital, quanto à possibilidade de se adequar a instituições de ensino que não disponham de elevados recursos financeiros, popularizando e democratizando a tecnologia e as experiências a esta relacionadas.

Finalmente, por ser um protótipo em desenvolvimento ainda esperasse que com a abertura do projeto para a comunidade, novas versões e funcionalidades sejam implementadas visto que mesmo o projeto encontrasse em fase de implementação das funções aqui apresentadas.

5. REFERÊNCIAS

- Acuña, F., Gordón, A., & Núñez, W. (2013). Design and implementation of a prototype lathe milling of computer numerical control. *2013 II International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA)*, 1–6.
- Alonso, D. A., Gil, J. E., & Martínez, F. H. (2015). Prototipo de máquina fresadora CNC para circuitos impresos. *Tekhnê*, 12(1), 23–38.
- Autodesk.com. (2022, novembro 14). *Free professional 3D modeling, CAD, CAM, CAE, and PCB software platform for education*. <https://www.autodesk.com/campaigns/education/fusion-360>.
- Buback et al. (2022, agosto 21). *RepRap*. <https://reprap.org/wiki/RepRap>.
- Free Software Foundation, Inc. (2022, agosto 21). *A Licença Pública Geral GNU*. Licenças.
- Gomes, J. C. (2020). Construção de fresadora de baixo custo controlada computacionalmente, para aplicações didáticas. *Revista Eixo*, 9(2), 13–26.
- JimVrsCNC. (2022, dezembro 5). *GRBL*. <https://github.com/pvico/grbl32>. <https://github.com/pvico/grbl32>
- Martin, R. L., Bowden, N. S., & Merrill, C. (2014). 3D printing IN TECHNOLOGY AND ENGINEERING EDUCATION. *Technology and Engineering Teacher*, 73(8), 30–35. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/3d-printing-technology-engineering-education/docview/1524958383/se-2>
- Montenegro, G. (2005). *Inteligência Visual e 3D*.

- Nitzsche, R. (2013). Design é tornar tangível uma intenção de transformações. *Sumários Revista da ESPM*, 17(3), 124–129.
- Oltean, S.-E. (2017). A PRACTICAL APPROACH TO THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A LOW COST 3D PRINTER USING OPEN SOURCE TECHNOLOGIES. *Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Targu Mures*, 14(2).
- Paulos, A. J. R. L. (2014). *Study and development of a didactic engraving system using a low powered laser diode*.
- Polastrini, H. F. (2016). Desenvolvimento de uma máquina CNC de baixo custo com software e hardware abertos. *Relatório (Graduando em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Minas Gerais*.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- Santos, B. P., Alberto, A., Lima, T. D. F. M., & Charrua-Santos, F. M. B. (2018). Indústria 4.0: desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 4(1), 111–124.
- UNESCO. (2019). *Certified Copy of the Recommendation on Open Educational Resources (OER)*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373755/PDF/373755eng.pdf.multi.page=3>
- Will Winder. (2022, dezembro 5). *Universal Gcode Sender*. https://winder.github.io/ugs_website/

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.