

Autor | Author

Jacó Cirino Gomes\*  
[jaco.gomes@estudante.ifb.  
edu.br]**CONSTRUÇÃO DE FRESADORA DE BAIXO  
CUSTO CONTROLADA COMPUTACIONALMENTE,  
PARA APLICAÇÕES DIDÁTICAS****COMPUTER-CONTROLLED LOW-COST MILLING MACHINE  
CONSTRUCTION FOR DIDACTIC APPLICATIONS**

**Resumo:** O avanço rápido da tecnologia nas últimas décadas tem ampliado a utilização de fresadoras CNC (Comando Numérico Computadorizado) no meio industrial. Devido à praticidade na prototipagem automática de peças, o CNC rompe o conceito de aplicação na indústria massiva e ganha considerável atenção na fabricação de peças individuais. Entretanto, um dos desafios encontrados para a popularização das máquinas é justificado pelo alto custo envolvido na construção. Dessa forma, a presente pesquisa propõe a construção de um modelo acessível de Fresadora CNC, com três eixos de movimentação, discutindo a viabilidade de aplicação em projetos de cunho acadêmico, seja em pesquisa, seja no processo de ensino-aprendizado. Com foco na sustentabilidade econômica, construiu-se uma máquina com material estrutural reutilizado, além de software e hardware de código aberto. Para perceber as diferenças entre o modelo proposto e uma máquina industrial no que diz respeito à precisão dos movimentos, foram realizados testes de repetibilidade de trajeto, os quais demonstraram pouca dispersão nos resultados. Além de incentivar práticas sustentáveis, o projeto apresentou custo cinco vezes menor do que os valores praticados no mercado, demonstrando que essa tecnologia pode se difundir para diversas escolas, incentivando a pesquisa e o desenvolvimento de outros projetos a partir da tecnologia CNC.

**Palavras-chave:** fresadora CNC, Grbl, router CNC, código aberto.

**Abstract:** The rapid advance of technology in recent decades has expanded the use of CNC milling machines in the industrial environment. Due to the practicality of automatic prototyping of parts, the CNC breaks the concept of application in the massive industry and gains considerable attention in the manufacture of individual parts. However, one challenge for the popularization of machines is its high cost of construction. That way, this research proposes an accessible three-axis CNC milling machine model, discussing the feasibility of application in academic projects, whether in research or the teaching-learning process. With a focus on economic sustainability, a machine with reused structural material was built, in addition to open-source software and hardware. To understand the differences between the proposed model and an industrial machine, concerning the accuracy of the movements, tests of path repeatability were performed, which showed little dispersion. In addition to encouraging sustainable practices, the project presented a cost 5-fold lower than the values practiced in the market, demonstrating that this technology can spread to several schools, encouraging research and development of other projects based on CNC technology.

**Keywords:** CNC milling machine, Grbl, CNC router, open-source.

Recebido em: 19/02/2019

Aceito em: 20/03/2020

## INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A partir da década de 50, as máquinas-ferramenta utilizadas para a fabricação de peças por meio da usinagem ganham um novo conceito em automação com a implementação do NC – Comando Numérico (LIRA, 2010).

Os comandos numéricos são utilizados em máquinas que possuem eixos de movimentação. A dinâmica dos eixos corresponde ao plano cartesiano, que define o posicionamento de uma ferramenta a cada movimento, antes controlado manualmente. A necessidade de padronização dos códigos NC para a automatização dos movimentos motivou pesquisadores do MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts) a desenvolverem, a partir da década de 50, um padrão de códigos chamado G-code, que define as configurações da máquina durante a usinagem. Mais tarde, com a evolução da tecnologia e o acesso ao computador, foi possível integrar os comandos numéricos a um ambiente computacional, dando origem ao CNC (Comando Numérico Computadorizado), tornando os processos de fabricação ainda mais eficientes, com menor necessidade de intervenção humana (CARSTENS; CARSTENS, 2015).

A Figura 1 mostra os sentidos de movimentação de um CNC de três eixos conforme o plano cartesiano. Esse é basicamente o funcionamento de máquinas CNC existentes no mercado, obedecendo aos sentidos dos eixos X, Y e Z, como podem ser identificados de acordo com a regra da mão direita.

Com o passar do tempo, o aprimoramento da eletrônica permitiu a criação e a utilização de sistemas CNC controlados por meio de microcontroladores, causando significativa redução nos custos de produção das máquinas. Como com-

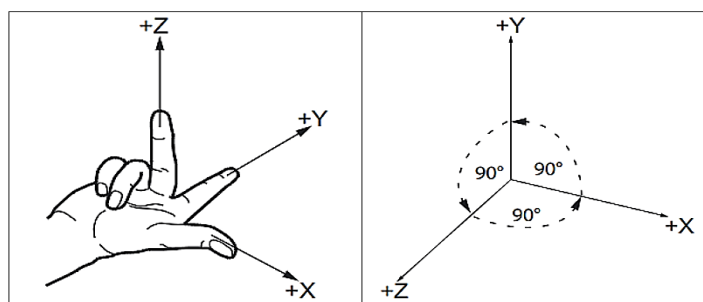
plemento ao conceito de redução de custos, um software livre chamado Grbl, escrito em linguagem C, foi desenvolvido e otimizado para a utilização em microcontroladores atmega328p (JAYACHANDRAIAH *et al.*, 2014). Segundo Polastrini (2016), o Grbl é um analisador de código G que, ao ser executado, é capaz de controlar uma fresadora CNC de até três eixos. Surge então, o termo Router CNC, nome comumente utilizado para a fresadora CNC de baixo custo.

Atualmente, há uma grande quantidade de equipamentos que utilizam a tecnologia CNC, tais como impressora 3D, torno CNC, fresadora CNC, Máquinas de Medição por Coordenadas, entre outros (POLASTRINI, 2016; ALONSO, 2015).

A tecnologia CNC vem se tornando mais acessível a cada dia devido à evolução da eletrônica. Com isso, trabalhos acadêmicos relacionados ao aprimoramento para a popularização de máquinas CNC têm sido recorrentes. Algumas das principais abordagens têm como objetivo a construção do equipamento com baixo custo de investimento, envolvendo principalmente a utilização do Arduino – central reduzida de processamento ([www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)), e softwares livres, como descrito por Khan *et al.* (2017), Fachim (2013), Jayachandriah *et al.* (2014), Messaoudi e Belhocine (2016) entre muitos outros autores.

Com os resultados promissores em pesquisas relacionadas à redução de custos, o CNC ultrapassa o conceito de aplicação industrial massiva e passa a ter atenção considerável em empresas de pequeno porte e na fabricação de peças individuais (GINTING *et al.*, 2017). Além disso, a ampla gama de aplicação do CNC tem atraído um maior número de pesquisadores nos últimos anos. Na maioria dos casos investigados, as fresadoras CNC baseadas em softwares livres são construídas para a prototipagem de placas de circuito impresso (SATHYAKUMAR,

**Figura 1** – Identificação dos eixos de movimentação



Fonte: manual CNC Siemens 802D. Disponível em: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/006/26219006/att\\_96612/v1/802Dsl\\_BPF\\_0407\\_pt-pt-BR.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/006/26219006/att_96612/v1/802Dsl_BPF_0407_pt-pt-BR.pdf). Acesso em: 02 mar. 2020.

2018), desenho bidimensional (PAWAR *et al.*, 2017), corte e gravação em madeira (GINTING *et al.*, 2017) e corte em acrílico (PATEL *et al.*, 2019).

Nesse contexto, justifica-se o grande potencial para a prototipagem de projetos acadêmicos com ênfase na integração de alunos ao meio tecnológico industrial. Segundo Sanches (2008), as empresas do ramo de fabricação procuram cada vez mais profissionais com conhecimento teórico-prático para a resolução de problemas. Nesse sentido, a inclusão da fresadora CNC na manufatura dos protótipos proporciona aos estudantes uma formação ampla, com maiores possibilidades de crescimento profissional.

A utilização do CNC em laboratório, além de estimular a criatividade dos alunos, reduz o tempo gasto em trabalhos manuais a partir de processos automáticos. De acordo com Polastrini (2016), ao reduzir o tempo de fabricação, o aluno pode dedicar-se mais ao desenvolvimento conceitual do projeto do que à própria fabricação do protótipo, proporcionando a ele um maior envolvimento com o tema da pesquisa.

Uma fresadora CNC pode dar um suporte considerável a alunos de cursos técnicos e de graduação no desenvolvimento da pesquisa, no aprendizado da Manufatura Assistida por Computador (CAM) – com auxílio de softwares de modelagem 3D –, e na programação de máquinas industriais, além de contribuir para o processo de ensino-aprendizado em geral.

Polastrini (2016) desenvolveu um CNC de baixo custo utilizando software e hardware livres. Em seu trabalho, o objetivo foi alcançado, tendo em vista o valor do capital investido, cerca de 5 vezes menor que os valores das máquinas com parâmetros semelhantes encontradas no mercado. O autor ressalta que, apesar de obter uma pequena variação no resultado da usinagem em relação ao valor convencional da peça, devido a possíveis folgas nos eixos, o resultado é satisfatório levando em conta o custo do projeto.

A fresadora CNC construída por Fachim (2013) teve um custo até 7 vezes menor que os preços encontrados no mercado; porém, o autor enfatizou que não foram considerados os custos extras, como, por exemplo, a mão de obra do desenvolvedor e os consumos de energia durante a fabricação e a construção do equipamento, que, nesse caso, necessitaria de um estudo para determinar a viabilidade do projeto. No entanto, deve-se considerar a aplicação acadêmica e, portanto, a mão de obra empregada – a qual representaria grande parte do valor empenhado na construção – quando realizada pelo próprio aluno, leva-o a ter um maior envolvimento com a mecânica do projeto, aprimorando a construção do conhecimento.

Robles-Algarín *et al.* (2018) demonstraram os resultados da construção de uma máquina para realizar a tarefa específica de perfuração de PCB (*Printed Circuit Board*). O estudo discute a viabilidade econômica de um equipamento didático a partir de materiais recicláveis. Entretanto, os autores não foram claros ao discutir o custo empenhado.

Motivados pelo aumento da utilização de CNC nas indústrias, Jayachandriah *et al.* (2014) mostraram os resultados da construção de uma Router CNC baseada em microcontrolador e um sistema embarcado de controle. Uma das etapas da pesquisa discute a viabilidade da máquina como um modelo educacional. De acordo com os autores, o projeto se adequa plenamente aos fins didáticos quando utilizados componentes de baixo custo, como o Arduino e os *softwares* livres, uma vez que caracterizam baixo custo de implementação e baixo consumo de energia durante a utilização, aliados à facilidade de operação devido à variedade de *softwares* livres existentes.

Conforme o estado da arte, muito se produz na busca de melhorias em termos de construção e disseminação de um equipamento CNC de baixo custo. No entanto, pouco se fala no desenvolvimento a partir de materiais reutilizados. Diante desse contexto, propõe-se a construção de uma fresadora CNC de baixo custo utilizando Arduino e *softwares* controladores de código aberto, bem como materiais reutilizados, a fim de estudar a viabilidade econômica do equipamento para a utilização em projetos de cunho acadêmico.

## MATERIAIS E METODOLOGIAS

O projeto desenvolvido no laboratório de fabricação mecânica do Instituto Federal de Brasília (IFB), *Campus* Taguatinga, ocorreu em três etapas, as quais serão descritas nas próximas seções deste artigo. Na primeira, foi realizada a seleção de elementos estruturais, incluindo elementos de máquina, além da fabricação e da montagem mecânica para a análise dinâmica da fresadora CNC. Na segunda etapa, realizaram-se os procedimentos de seleção e implementação da parte eletrônica. A terceira etapa consistiu na seleção do *software* de controle, bem como no programa de interpretação de código G. A Figura 2 mostra um fluxograma para melhor entendimento da construção da fresadora.

Com o objetivo de avaliar diferentes materiais construtivos, a Fresadora foi construída a partir de dois tipos distintos de materiais, primeiramente em MDF (*Medium Density Fiberboard*) – placa de fibra de média densidade tendo como material base a madeira – e, em seguida, com estrutura metálica, ambos reutilizados.

## MECÂNICA

### ESTRUTURA

A estrutura é parte fundamental na seleção dos equipamentos, já que garantirá a rigidez da máquina ou determinará se haverá grandes vibrações durante a movimentação. Para tanto, é necessário definir as dimensões do modelo que se deseja, isto é, a área útil de trabalho da fresadora. Tais dimensões dependem do comprimento das guias lineares que serão utilizadas.

Com o objetivo de comparar o comportamento mecânico a partir de diferentes materiais construtivos, decidiu-se utilizar o MDF, já consolidado em outros trabalhos – como no de Khan *et al.* (2017) e no de Messaoudi e Belhocine (2016) –, para a construção de fresadora CNC. O segundo material selecionado foi o perfil estrutural de chapa conformada, de aproximadamente 1,5 mm de espessura, que é utilizada em centros de processamento de dados (Data Center). A conformação em que foi submetida proporcionou mais resistência à máquina.

As guias lineares foram retiradas de impressoras de jato de tinta descartadas. Tais guias são retificadas e possuem um tratamento superficial para melhorar a resistência do material. Utilizaram-se guias com dimensões de 10 x 430 mm (diâmetro e comprimento, respectivamente), para o eixo Y; e 10 x 415 mm para o eixo X. A seleção do diâmetro deve levar em consideração os rolamentos lineares existentes no mercado.

No geral, o curso de movimentação do eixo Z não necessita de grandes dimensões de comprimento e diâmetro em relação

aos outros eixos; portanto, em busca de redução de peso, foram utilizadas guias de 8 x 200 mm, dimensões suficientes para suportar os esforços durante a usinagem com o modelo proposto.

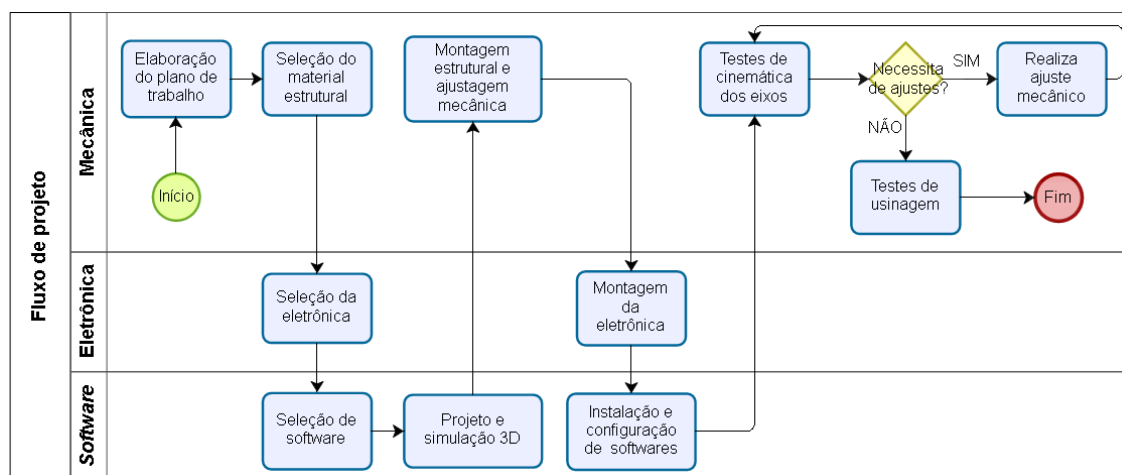
### MANCAIS DE ROLAMENTO

Para o deslizamento da estrutura nos eixos, por meio das guias lineares, utilizaram-se os mancais de rolamento lineares (modelo LMxUU, em que “x” indica o diâmetro do eixo em milímetros). São rolamentos de baixo custo, amplamente utilizados em dispositivos CNC, como Routers e impressoras 3D. O rolamento linear LM8UU, com comprimento de 24 mm, diâmetro interno de aproximadamente 8 mm e diâmetro externo de 15 mm, foi utilizado no eixo Z, além do rolamento LM10UU para os eixos X e Y, com comprimento de 29 mm, diâmetro interno de aproximadamente 10 mm e diâmetro externo de 19 mm. Segundo Carstens e Carstens (2015), esse tipo de mancal de rolamento foi projetado para não haver folga, desalinhamento ou interferência no sistema de deslizamento. Para o acoplamento do fuso no eixo Z, responsável por realizar o deslocamento do eixo, foram utilizados mancais de rolamento radial, encontrados em impressoras de jato de tinta.

### SUPORTE DE MANCAIS DE ROLAMENTO (PILLOW BLOCK)

Os elementos de acoplamento para os rolamentos lineares, chamados comercialmente de *Pillow blocks*, proporcionam um alinhamento da estrutura móvel dos eixos durante a monta-

Figura 2 – Fluxograma de construção e validação



Fonte: elaborado pelo autor.

gem, isto é, o alinhamento da mesa da máquina. Por ser um elemento de custo elevado em relação ao preço dos rolamentos lineares, blocos de fixação em alumínio descartados foram adaptados para o encaixe dos mancais, utilizando uma furadeira de coluna do laboratório de fabricação mecânica do IFB, *Campus* Taguatinga. A adaptação dos blocos causou uma redução de custo considerável. Além de proporcionar aos alunos aprendizado em operação de máquinas, estimulou a criatividade para a adaptação e ajuste mecânico de peças a partir de materiais reutilizados. Para a fixação dos rolamentos aos pillow blocks, foram utilizados anéis de retenção, assim como fizeram Carstens e Carstens (2015).

## SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

Em busca de um método de baixo custo para a movimentação dos eixos, foram utilizadas, na fresadora com estrutura de MDF, barras roscadas de  $\frac{1}{2}$ " (meia polegada), com rosca de 13 fios por polegada, e porca sextavada nos três eixos. Com o intuito de realizar a comparação entre os sistemas, o movimento dos eixos X e Y da fresadora com estrutura metálica foi realizado por meio de um sistema correia-polia. Utilizou-se o conjunto correia-polia GT2 de baixo custo acoplado ao *pillow block* no centro de cada eixo. O conjunto possui basicamente correia de 6 mm de largura, passo de 2 mm, e polia de 20 dentes. Já no eixo Z, que não necessita de grandes velocidades de avanço linear, a transmissão se dá por meio de um fuso trapezoidal THSL-300-8D, dimensionado para suportar alto torque,

acoplado ao motor por meio de um acoplamento flexível 6,35 x 8 mm.

Com a estrutura selecionada, a fresadora foi projetada para possuir área útil de 230 x 250 x 100 mm. Os limites de movimento dos eixos são definidos por fins de curso *Micro Switch* em cada eixo; ao serem acionados, emitem um comando para o controlador abortar a tarefa de movimento, evitando colisões.

## ELETRÔNICA

### MICROCONTROLADOR

O Arduino Uno é uma central reduzida de processamento de dados de código aberto baseada no microcontrolador ATmega328P. A central pode controlar dispositivos ou receber dados de sensores de forma analógica ou digital. Após o Arduino receber o *software* interpretador de código G, ele é responsável por enviar comandos via computador que controlam os motores de passo e realizam os movimentos da fresadora. Segundo Jayachandriah *et al.* (2014), o Arduino atua como o cérebro da fresadora CNC. O Arduino UNO pode ser visto na Figura 3.

### DRIVERS A4988 E CNC SHIELD

A comunicação entre o Arduino e o sistema mecânico é realizada por meio da placa CNC *shield*. Trata-se de um *shield* de

Figura 3 – Arduino Uno



Fonte: Arduino. Disponível em: <https://www.arduino.cc>. Acesso em: 03 mar. 2020.

acoplamento dimensionado para o Arduino UNO, com aplicação específica para CNC. Essa placa é dimensionada para receber quatro drivers de motores para o controle dos três eixos da fresadora. A CNC *shield* permite alimentação externa de 12 a 36 V (KHAN *et al.*, 2017).

Os motores são controlados por um conjunto de drivers A4988, para os quais foi desenvolvido o CNC *shield*. O conjunto de controle do CNC pode ser visualizado na Figura 4.

A tensão de alimentação fornecida ao motor de passo é ajustada por meio do potenciômetro (P) mostrado na Figura 4. O datasheet do driver fornece a equação para o cálculo da tensão, conforme Equação 1:

$$I_{\text{TripMAX}} = \frac{V_{\text{REF}}}{8R_S} \tag{1}$$

Em que:

$V_{\text{REF}}$  – É a tensão de referência para alimentação do motor;

$R_S$  – Valor dos resistores de sensibilidade mostrados na Figura 4;

$I_{\text{TripMAX}}$  – A corrente máxima suportada pelo motor.

A medição da tensão pode ser realizada diretamente entre o potenciômetro e um pino elétrico negativo (GND), na própria placa.

Devido ao aquecimento proveniente da corrente elétrica, que passa pelos *drivers*, normalmente são utilizados dissipadores de calor nos circuitos de driver. Segundo Khan *et al.* (2017), esse modelo de *driver* pode ser alimentado idealmente por uma

fonte entre 8 e 30 V. Além disso, suporta uma corrente elétrica de até 2 amperes e garante o funcionamento de motores de duas fases bipolares.

### MOTOR DE PASSO

Devido às características intrínsecas dos motores de passo, como controle de velocidade e inversão de rotação, eles são amplamente utilizados, principalmente em equipamentos como impressoras e *drives* de disco rígido, indispensáveis em fresadoras e impressoras 3D (CARSTENS; CARSTENS, 2015).

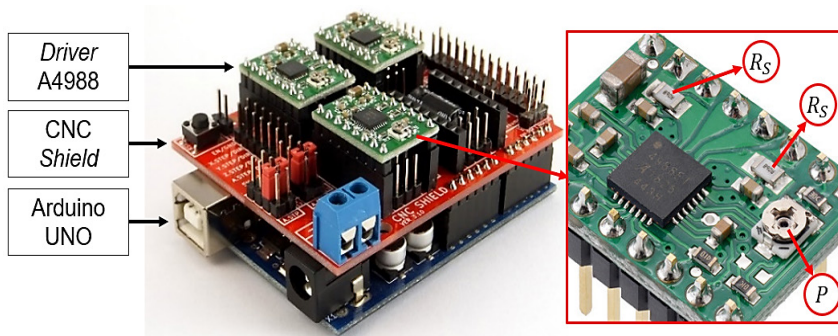
Motores de passo são construídos com diferentes tipos de enrolamento, e são caracterizados em Bipolar e Unipolar (KHAN *et al.*, 2017). Os três motores NEMA 23, da fabricante Tamagawa-seik, modelo TS3103N40, retirados de grandes impressoras de jato de tinta descartadas, foram utilizados na forma bipolar, isto é, utilizando quatro dos seis fios de saída existentes no motor para adequação aos *drivers* A4988.

A Tabela 1 mostra alguns dados dos motores.

Por meio do diagrama da Figura 5, pode-se identificar as bobinas (B1 e B2) e o tipo de ligação dos motores Bipolar e Unipolar.

O diagrama da Figura 5 representa os tipos de motores mais comuns existentes no mercado. Há motores de passo com 4, 5, 6 e 8 fios de saída. É possível observar a configuração de motores unipolares e bipolares, em que cada ponto indica a saída de um fio proveniente das bobinas. Como observado, um motor unipolar pode ser utilizado como bipolar isolando os fios comuns  $C_1$  e  $C_2$  separadamente (conforme o datasheet dos motores utilizados, as cores dos fios são, preta e branca). De acordo com Khan *et al.* (2017), motores de passo na configuração uni-

Figura 4 – Conjunto de controle da fresadora CNC



Fonte: adaptado de (VEER, 2017).

polar possuem menor torque e menor velocidade, enquanto os bipolares apresentam comparativamente alto torque e alta velocidade. Dessa maneira, utilizando a configuração bipolar, além de ser compatível com os *drivers* A4988, tem-se um ganho no torque e na velocidade.

O gráfico da Figura 6, disponibilizado pelo fabricante do motor por meio do *datasheet*, relaciona o torque e a velocidade de rotação em pulsos por segundo.

Nessa configuração (*full step*), na qual se utilizam os passos do motor sem divisão, o motor executa 200 pulsos para um giro de 360°, isto é, 1,8° de rotação para cada pulso, podendo ser ajustada por meio do *driver* A4988 e obter divisões para redução dos passos. Observa-se que, quanto maior a velocidade do motor, menor o torque. Isso é importante para estabelecer a relação entre o peso da estrutura mecânica utilizada e a velocidade que se deseja alcançar em cada eixo, o que influenciará no tempo de usinagem.

A conexão dos motores aos drivers exige a montagem dos conectores MODU, como pode ser visto na Figura 7.

É necessário realizar a identificação dos pares das bobinas, para que sejam alocados sequencialmente no alojamento MODU. A identificação pode ser realizada por meio de um multímetro ou observada no próprio *datasheet* do motor de passo. Na Figura 7(d), os pares das bobinas são roxo-azul e verde-amarelo.

Para suportar a carga dos 3 motores e um *cooler* para o resfriamento da eletrônica, utilizou-se uma fonte chaveada de 24 V e 10A, já que a corrente total de utilização não ultrapassaria 5A, somada a partir dos dados de cada componente.

## MOTOR PARA FRESAMENTO (SPINDLE)

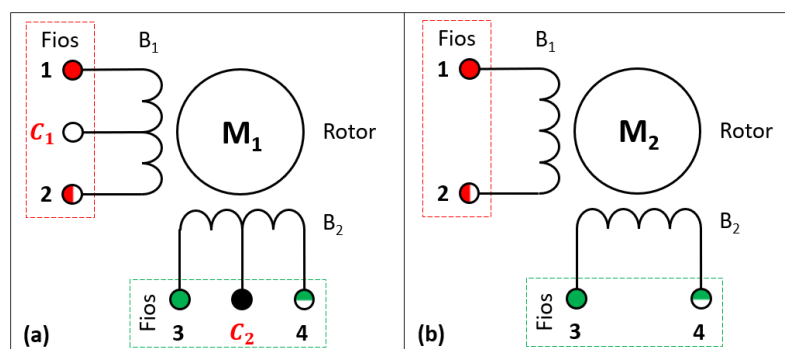
Na pesquisa sobre os preços e especificações de *spindles*, verificou-se que seria viável o uso de uma Dremel 4000. A

**Tabela 1** – Dados do motor de passo

Conexão	NEMA	Tensão nominal (V) / Fase	Corrente (A) / Fase	Torque N · m (Kgf · cm)	Ângulo de fase	Passos por revolução	Fases
Bipolar (Série)	23	6,0	1,2	0,5 (5,0)	1.8°	200	2

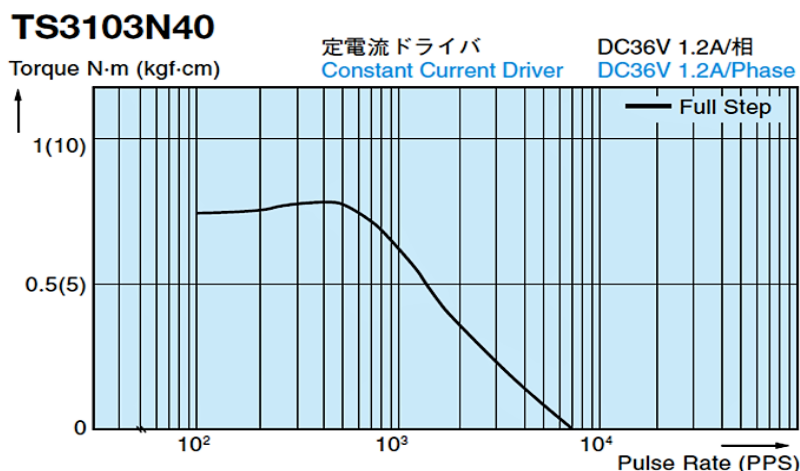
Fonte: *datasheet* motor Tamagawa TS3103N40. Disponível em: <https://www.tamagawa-seiki.com>. Acesso em: 02 mar. 2020.

**Figura 5** – Representação gráfica do motor de passo



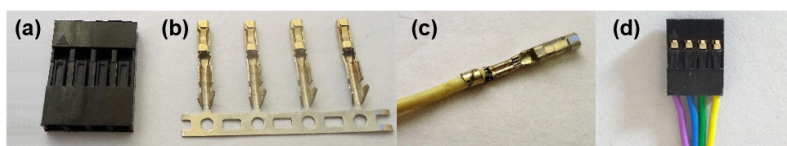
a) Configuração Unipolar; b) Configuração Bipolar. Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 6 – Gráfico de desempenho do motor de passo



Fonte: datasheet motor Tamagawa TS3103N40. Disponível em: <https://www.tamagawa-seiki.com>. Acesso em: 02 mar. 2020.

Figura 7 – Terminais e alojamento MODU



a) Alojamento; b) Terminais; c) Fio com terminal; d) Conjunto montado. Fonte: elaborado pelo autor.

escolha levou em consideração o peso, a disponibilidade no mercado nacional – o que é interessante caso se necessite de assistência técnica –, além do melhor custo-benefício.

A Tabela 2 lista os principais itens mecânicos e eletroeletrônicos utilizados no projeto. Outros itens de necessidade básica, como fita isolante, parafusos, porcas e arruelas, entre outros, não foram considerados nessa tabela.

## SOFTWARE

### ○ BCNC

A fresadora CNC deve ser controlada por um *software* que funciona a partir de uma plataforma Open Source, para que seja mantida a ideia de baixo custo. Existem várias opções de *software*, como o bCNC, o Universal G-code Sender, entre outros. Utilizou-se o *software* bCNC pelo motivo de oferecer excelente interface gráfica, além de permitir autonivelamento

entre a mesa e o *spindle* da fresadora CNC. O *software* se comunica com o Arduino por meio de um protocolo USB serial (FACHIM, 2013).

### ○ GRBL

O Grbl é um *software* escrito em linguagem C. Trata-se de um interpretador de código G que foi desenvolvido e otimizado para utilização em Arduino. O *software* possui domínio público e tem um alto desempenho para controle de máquinas cartesianas de até 3 eixos, uma vez que suporta as principais funções preparatórias modais utilizadas em programação CNC, listadas na Tabela 3

O objeto a ser usinado é criado em um *software* de modelagem 3D. Por meio do sistema CAD/CAM (*Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing*), gera-se um código chamado *G-code*. O *software* bCNC é responsável por fazer a



leitura do código e transferir para o Arduino, que, por sua vez, controla os movimentos da fresadora CNC por meio do Grbl.

A documentação completa sobre o Grbl, a qual inclui informações de instalação do *software*, bem como configurações dos parâmetros de máquina, como velocidade, aceleração, entre outros, pode ser encontrada no repositório GitHub, disponível em Jeon (2017).

### SIMULAÇÃO 3D

A avaliação mecânica das guias lineares não pode ser realizada numericamente, uma vez que não se tem acesso às informações das propriedades do material. No entanto, por meio da representação dos modelos, de acordo com as estruturas selecionadas, pode-se observar os esforços que atuarão no equipamento e possíveis deformações das guias lineares. Por meio do *software* Inventor Professional 2016, desenvolvido pela Autodesk ([www.autodesk.com.br](http://www.autodesk.com.br)), foi possível observar os esforços a partir de uma análise estática, conforme a Figura 8.

A análise estrutural permite ao desenvolvedor ter uma pré-visualização de possíveis problemas futuros, e tentar resolvê-los antecipadamente.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira montagem da fresadora, em MDF, o sistema de movimentação com barra roscada não suportou velocidade de movimento acima de 100 mm/min, havendo falha devido ao atrito excessivo. Com essa velocidade, o tempo de usinagem pode se tornar dispendioso. Além disso, não foram alcançados resultados satisfatórios durante o teste de repetibilidade. A utilização do MDF não permitiu rigidez estrutural suficiente para o objetivo de pouca dispersão nos resultados. Provavelmente, o peso do material causou a propagação de pequenas folgas nos pontos de fixação após algumas movimentações dos eixos.

A utilização de porca sextavada no fuso, para a movimentação dos eixos, causa um fenômeno chamado *folga de trabalho*, comum em máquinas de fuso. Possivelmente, essa folga contribuiu para os resultados não desejados. A folga de trabalho poderia ser compensada via programação CNC caso

Tabela 2 – Materiais utilizados

Mecânica		Eletroeletrônicos	
Quantidade	Descrição	Quantidade	Descrição
1	Estrutura em material MDF ou metal	3	Motores de passo
2	Guia Linear 8 x 200 mm	3	Alojamento MODU 4 vias
4	Guia Linear 10 x 430 mm	6	Alojamento MODU 2 vias
16	Anel de retenção diâmetro interno 10 mm	24	Terminal MODU
8	Anel de retenção diâmetro interno 8 mm	1	Arduíno UNO
8	Rolamento linear LM10UU	1	Cabo de dados USB-A/USB-B
4	Rolamento linear LM8UU	1	CNC <i>Shield</i>
2	Rolamento radial	3	Drivers A4988
12	<i>Pillow block</i>	1	Fonte 24V 10A
1	Acoplamento flexível diâmetro interno 6,35 x 8 mm	12 metros	Cabo flexível 22AWG
1	Fuso trapezoidal THSL-300-8D	3	<i>Micro switch</i> (fim de curso)
2 metros	Correia GT2-6 mm	1	Cabo de força (alimentação da fonte)
4	Polia GT2 20 dentes	1	Dremel 4000

Fonte: elaborado pelo autor.

**Tabela 3** – Funções preparatórias

Grupo Modal	Comandos
Modo de movimento	G0, G1, G2, G3, G38.2, G38.3, G38.4, G38.5, G80
Seleção de sistema de coordenada	G54, G55, G56, G57, G58, G59
Seleção do plano de trabalho	G17, G18, G19
Modo de distância	G90, G91
Modo de distância arco IJK	G91.1
Modo taxa de alimentação	G93, G94
Modo unidades	G20, G21
Compensação do raio do cortador	G40
Comprimento da ferramenta	G43.1, G49
Modo de programação	M0, M1, M2, M30
Estado do <i>spindle</i>	M3, M4, M5
Estado do refrigerante	M7, M8, M9

Fonte: (MOYER, 2019).

o Grbl suportasse um comando de correção de folga de eixo como o G60.

A Figura 9 mostra a fresadora CNC em 3D e confeccionada em MDF.

Já a estrutura metálica apresentou melhores resultados, não havendo folgas devido ao uso de correias de transmissão, alcançando velocidade de até 2.000 mm/min na movimentação rápida comandada pelo código G0, sem prejuízos na performance dinâmica do equipamento. Além disso, o modelo de metal, apresentado na Figura 10, apresentou rigidez estrutural superior à do MDF.

Para facilitar a reprodutibilidade, a Figura 11 mostra uma visualização explodida dos detalhes construtivos da fresadora CNC.

Vale ressaltar que o projeto 3D depende da estrutura disponível. Dessa forma, o *design* do modelo reproduzido, no geral, pode variar conforme a necessidade e a abstração do desenvolvedor.

## ANÁLISE DE REPETIBILIDADE DE TRAJETO

Para os testes de repetibilidade, utilizou-se uma caneta esferográfica. A avaliação do CNC de MDF terminou nesse teste experimental, uma vez que os resultados apresentaram maior dispersão do desenho a cada repetição pelos motivos já discu-

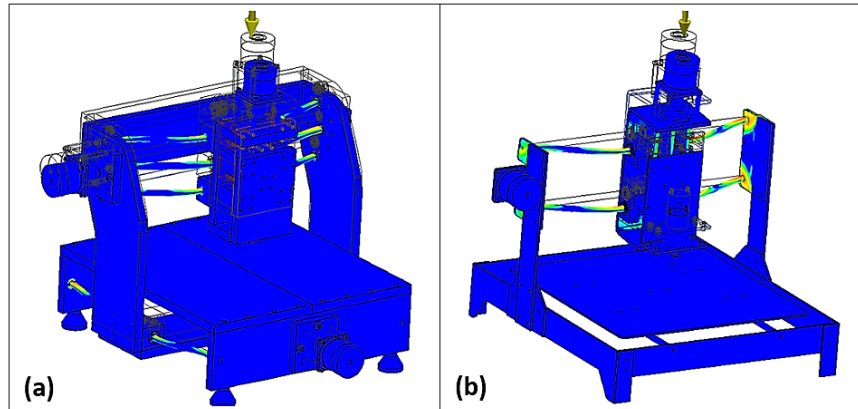
tidos. Em se tratando do CNC metálico, foram utilizados dois métodos avaliativos, o método de repetibilidade e a usinagem de uma peça simples, de acordo com a Figura 12.

A Figura 13(a) mostra o desenho que foi submetido a 5 seções, com 10 repetições de trajeto a cada seção. Como visto, não houve desvios de trajeto aparentes.

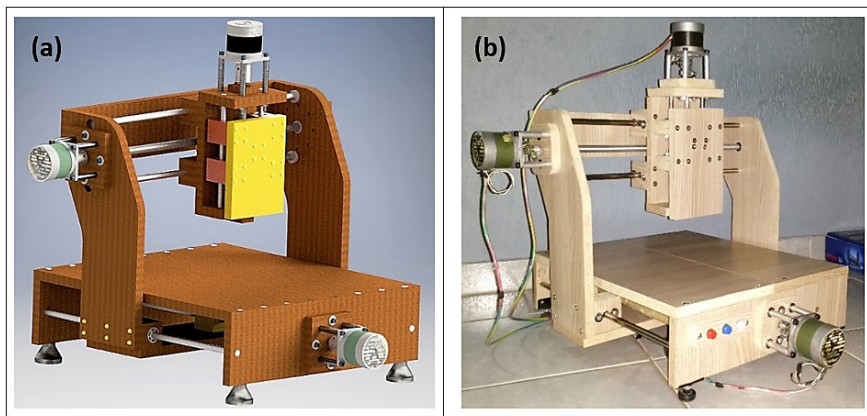
Para consolidar o teste utilizando as mesmas dimensões do desenho, a peça da Figura 12 foi usinada em material MDF utilizando uma ferramenta de 3 mm de diâmetro, conforme Figura 13(b).

As amostras de medições foram obtidas por meio de um paquímetro com resolução de 0,1 mm, sem dados de calibração do instrumento. Foram obtidos resultados de medição de  $100,1 \pm 0,2$  mm para a distância de 100 mm e  $49,9 \pm 0,2$  mm para o diâmetro de 50 mm, com desvio padrão de 0,6 mm e erro aleatório de 0,2 mm para todas as medições. Com a análise, conclui-se que os valores estão dentro de uma faixa aceitável para esse projeto, uma vez que não se espera a utilização industrial do equipamento.

A usinagem foi realizada a partir de movimentos incrementais negativos no eixo Z, isto é, a cada contorno do desenho realizado, a máquina desloca a ferramenta 0,2 mm no sentido da peça e realiza o corte até alcançar a profundidade de 3 mm. Todos os parâmetros de usinagem foram definidos no *software* por meio do sistema CAD/CAM. O resultado de medição da

**Figura 8** – Análise estrutural estática

a) Modelo em MDF; b) Modelo em metal. Fonte: resultados da pesquisa.

**Figura 9** – Projeto CNC de MDF

a) Modelo MDF 3D; b) Modelo MDF construído. Fonte: resultados da pesquisa.

profundidade apresentou valor de  $3,0 \pm 0,1$  mm; entretanto, é necessária uma avaliação por meio de um paquímetro com menor resolução, devido ao pequeno valor da profundidade.

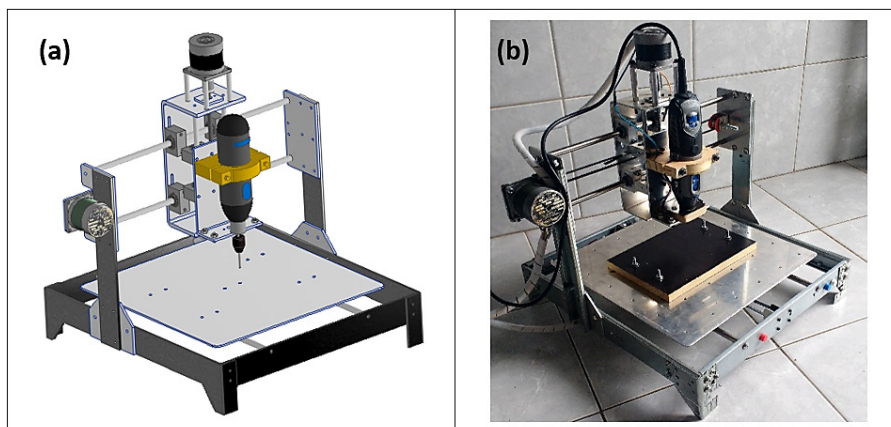
Para quantificar as incertezas envolvidas com maior confiabilidade, é fundamental a utilização de um instrumento de medição com menor resolução e melhor exatidão, acompanhado de certificado de calibração; o certificado garante a rastreabilidade do instrumento. Além disso, um estudo estatístico aprofundado é necessário para que seja possível definir o nível de aplicabilidade da fresadora CNC dentro do contexto acadêmico, o que pode ser uma abordagem futura para a avaliação dos resultados desse projeto. No entanto, do ponto de

vista econômico, o objetivo dessa pesquisa foi alcançado com a abordagem utilizada.

## CUSTOS E MERCADO

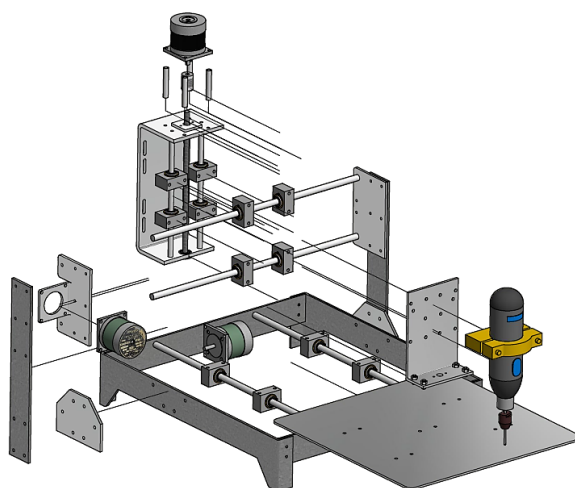
Não se tratando de produto industrial, uma fresadora CNC com especificações semelhantes às daqui desenvolvida custa em média R\$ 4.000,00 (valores praticados entre 2018 e 2019). Essas fresadoras são destinadas a corte e gravações, funções que podem ser executadas com a substituição do *spindle* por um dispositivo laser. Os custos de modelos industriais são expressivamente maiores, o que restringe a adoção do equipamento para o processo de ensino-aprendizado na área de usi-

Figura 10 – Projeto CNC Metálico



a) Modelo metálico 3D; b) Modelo metálico construído. Fonte: resultados da pesquisa.

Figura 11 – Projeto 3D, projeção explodida

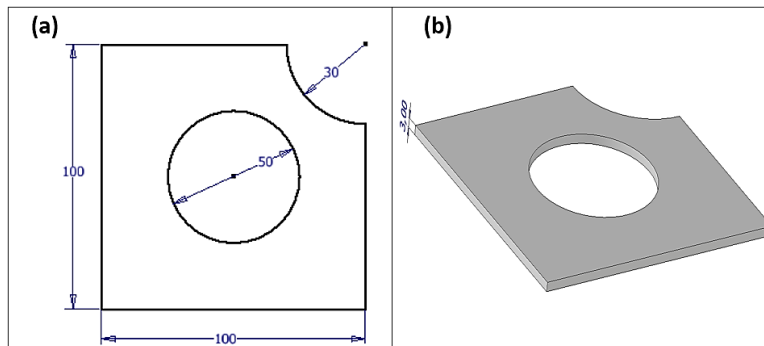


Fonte: resultados da pesquisa.

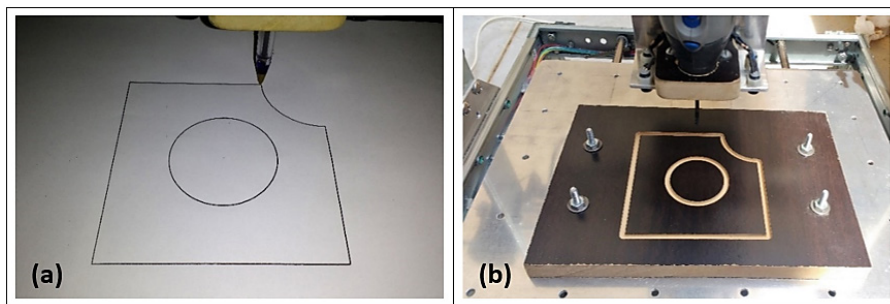
nagem a poucas escolas. O valor do capital empenhado nesse projeto totalizou R\$ 729,42, valor cerca de cinco vezes menor que os valores praticados no mercado. Esse valor demonstra a relevância das pesquisas relacionadas ao desenvolvimento dessa tecnologia a um custo acessível, e abre caminho para a disseminação do equipamento para escolas que possuem recursos financeiros incompatíveis com altos investimentos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

No desenvolvimento do projeto – em que se buscou eficiência por meio de uma estrutura reutilizada não específica para a construção de fresadoras –, conseguiu-se baixo custo, eficiência no processo de usinagem e eficácia comprovada com o resultado do capital investido, o que demonstra a sustentabilidade ambiental e econômica do projeto.

**Figura 12** – Desenho técnico

a) Sketch 2D; b) Peça 3D. Medidas em milímetro. Fonte: elaborado pelo autor.

**Figura 13** – Testes do equipamento CNC

a) Teste de repetibilidade; b) Teste de Usinagem. Fonte: resultados da pesquisa.

O modelo do CNC em MDF pode ser aprimorado utilizando materiais de melhor qualidade, como o fuso trapezoidal; porém, há um grande esforço radial no eixo Y, já que se movimenta com a carga do eixo Z acoplada. Como mostrado na Figura 8, pode haver deformação na guia linear e com isso a necessidade de dimensionamento, o que levaria à compra de guias com diâmetro maior. No ponto de vista econômico, torna-se viável a utilização independente dos eixos, como no modelo de CNC metálico. Além de menor esforço radial nas guias, ocasionado pela carga, o sistema correia-polia pode ser implementado, o que traz mais velocidade no avanço rápido, reduzindo o tempo de usinagem.

A análise da precisão pode ser mais satisfatória ao utilizar um paquímetro com melhor resolução; contudo, o objetivo foi alcançado para a aplicação designada, com capacidade de realizar usinagem em madeira e possivelmente em acrílico. Com uma estrutura construtiva mais robusta, é possível a usinagem em metais, uma vez que tanto o Grbl como o *software* de con-

trole CNC oferecem suporte para a resolução na casa de centésimo de milímetro.

O valor da CNC desenvolvida, além de incentivar práticas sustentáveis, apresenta custo cinco vezes menor do que os valores praticados no mercado, demonstrando que essa tecnologia pode se difundir para diversas escolas, incentivando a pesquisa e o desenvolvimento de outros projetos a partir da tecnologia CNC.

## REFERÊNCIAS

- ALONSO, D. A.; GIL, J. E.; MARTÍNEZ, F. H. Prototipo de máquina fresadora CNC para circuitos impresos. *Tekhnê*, v. 12, n. 1, p. 23-38, 2015.
- CARSTENS, S. F.; CARSTENS, T. A. **Projeto e fabricação de uma fresadora CNC para prototipagem de placas de circuito impresso**. Relatório (Graduação de Tecnologia em Mecatrônica Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Joinville. 2015.
- FACHIM, A. **Projeto fresadora CNC com plataforma livre Arduino**. Relatório (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre. 2013.
- GINTING, R.; HADIYOSO, S.; AULIA, S. Implementation 3-axis CNC router for small scale industry. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 12, n. 17, p. 6.553-6.558, 2017.
- JAYACHANDRAIAH, B. *et al.* Fabrication of Low Cost 3-Axis CNC Router. *International Journal of Engineering Science Invention*, v. 3, n. 6, p. 1-10, 2014.
- JEON, S. Grbl Home. **GitHub**, 19 Março 2017. Disponível em: <<https://github.com/grbl/grbl/wiki>>. Acesso em: 05 mar. 2019.
- KHAN, T. A. *et al.* **A Micro-Controller Controlled 3 Axis CNC Machine for Engraving and Designing**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Eletrônica) – School of Engineering and Computer Science, BRAC University. Bangladesh. 2017.
- LYRA, P. V. A. **Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática**. Relatório (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade de Brasília. Brasília. 2010.
- MESSAOUDI, A.; BELHOCINE, B. **Implementation of Low Cost Three Axis CNC Machine with Network Control**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Eletrônica) – University M'Hamed BOUGARA. Boumerdes. 2016.
- MOYER, T. Grbl v1.1 Commands. **GitHub**, 19 May 2019. Disponível em: <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Grbl-v1.1-Commands>. Acesso em: 03 mar. 2019.
- PATEL, P. N.; PAVAGADHI, S. D.; ACHARYA, S. G. Design and Development of Portable 3-Axis CNC Router Machine. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 6, n. 3, p. 1.452-1.455, 2019.
- PAWAR, A. S. *et al.* 3 AXIS DRAWING MACHINE. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 4, n. 3, p. 693-697, 2017.
- POLASTRINI, F. H. **Desenvolvimento de uma Máquina CNC de baixo custo com software e hardware abertos**. Relatório (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. Formiga. 2016.
- ROBLES-ALGARÍN, C.; ECHAVEZ, W.; POLO, A. Printed circuit board drilling machine using recyclables. *Electronics*, v. 7, n. 10, p. 240, 2018.
- SANCHES, J. M. **Desenvolvimento de uma Fresadora CNC de Baixo Custo para Fins Didáticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.
- SATHYAKUMAR, N. *et al.* A Build-Your-Own Three Axis CNC PCB Milling Machine. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 11, p. 24.404-24.413, 2018.
- VEER, K. V. D. Connecting Grbl. **GitHub**, 24 Abril 2017. Disponível em: <https://github.com/grbl/grbl/wiki/Connecting-Grbl>. Acesso em: 04 mar. 2019.

## CURRÍCULO

\* Tecnólogo em Automação Industrial pelo Instituto Federal de Brasília. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1058459388378050>