

Projeto e montagem de uma fresadora CNC

Project and manufacturing of a CNC milling machine

Edenilson Bueno da Rocha¹ , Felipe Oechsler¹ , Leonardo Campagnollo¹ , Rafael Macêdo Araújo¹ .

¹ UniSENAI - Santa Catarina, Brasil

*Correspondente: edenilson.rocha@edu.sc.senai.br

Resumo

Esse artigo mostra um estudo, projeto, desenvolvimento, ajustes e validação de uma fresadora CNC com três eixos para fins não industriais. Esse tipo de equipamento possui um amplo espectro de aplicações, que vão de impressoras 3D a robôs de manuseio de materiais. Neste trabalho, pode-se ver todos os passos, desde a escolha de materiais, desenvolvimento do sistema embarcado até testes finais com a fresadora funcionando, em que qualquer pessoa com o conhecimento em mecânica, eletrônica, automação e programação pode usar de base para construir sua própria fresadora ou equipamento com controle prismático de três eixos.

Palavras-chave: fresadora; CNC; automação; sistemas embarcados; motor de passo.

Abstract

This article presents a study on the design, development, adjustments and validation of a CNC milling machine with three axes for non-industrial uses. This equipment has a vast spectrum of applications, as in 3D printers and pick-and-place robots. This work encompasses all the steps, from the choice of materials and development of the embedded system to the final tests with the milling machine in operation, allowing anyone with knowledge in mechanics, electronics, automation and programming to build their own milling machine or another equipment with three-axis prismatic control.

Keywords: milling machine; CNC; automation; embedded systems; stepper motor.

1. INTRODUÇÃO

Com a quantidade de informações, tutoriais e manuais de fácil acesso e sem custos, disponíveis na internet, o “faça você mesmo” se tornou uma realidade, seja por motivos de construir algum dispositivo com um menor custo, conseguir gerar uma renda extra ou até como forma de hobby. Porém, mesmo em um ambiente residencial, não é necessário limitar-se a trabalhar somente com ferramentas manuais. A utilização de pequenas máquinas pode gerar uma diversidade de objetos fabricados, obtendo como resultado produtos com qualidade.

O objetivo deste trabalho é apresentar todas as etapas de projeto, do desenvolvimento de componentes à construção e testes de um protótipo. A fresadora CNC conta com três eixos, e serão explanados todos os passos para que qualquer pessoa possa construir sua própria máquina para usinagem de pequenas peças.

Conforme Gomes (2020), uma fresadora é uma máquina/ferramenta que é capaz de transformar um material bruto em qualquer peça com alguma complexidade geométrica. Contempla em sua construção um motor (do tipo *spindle*), uma ferramenta de corte e movimentos lineares para executar a usinagem. Uma máquina CNC é qualquer equipamento eletrônico que guia ferramentas ao longo de um plano cartesiano (POLASTRINI, 2016).

Para o controle, será desenvolvido um sistema embarcado (placa de circuito impresso) que, para obter o resultado esperado, precisará agrupar três principais pontos: desenvolvimento da fonte de alimentação, que é responsável por energizar toda parte de controle e acionamentos; o microcontrolador, que é o cérebro da máquina; e os drives de acionamento dos motores de passo usados para realizar os movimentos lineares no plano cartesiano da máquina (GOMES, 2020). Confor-

me Polastrini (2016), os motores de passo são dispositivos eletromecânicos controlados por uma sequência de pulsos elétricos que resultam em um movimento rotacional, possuindo como característica seu alto torque, sincronismo e posicionamento.

Faz-se necessário um *firmware* para interpretar os códigos G, também conhecidos como *G-code*. Esse código foi desenvolvido para suprir a necessidade dos fabricantes industriais em ter uma linguagem padronizada em sistemas de Controle Numérico Computadorizado (CNC). Sua principal função é posicionar a máquina com precisão, velocidade e eficiência na repetição ao longo das coordenadas X, Y e Z, tornando-o a linguagem padrão para esse tipo de controle.

De acordo com Enokela *et al.* (2022), o GRBL é um software escrito em linguagem C e trata-se de um interpretador de código G que foi desenvolvido e otimizado para utilização em Arduino. Ele é o responsável por interpretar os códigos G que foram enviados ao Arduino pelo usuário, transformando as coordenadas em movimento dos motores, segundo Veer (2021).

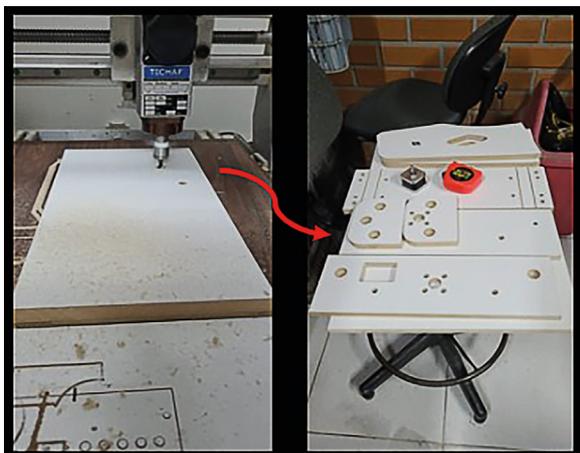
2. PROJETO E MONTAGEM DA FRESADORA CNC

2.1 Construção física da máquina

Uma fresadora CNC, assim como qualquer máquina desse tipo, é composta por um circuito lógico, um circuito de potência e um circuito de comunicação, além da parte mecânica, que assim interagem para tornar reais os desenhos feitos nos softwares CAD.

Os materiais e componentes escolhidos para a montagem da fresadora foram selecionados de forma a atender resistência mecânica, baixo orçamento, fácil aquisição e moldagem dos componentes. Sua estrutura base é composta por MDF com espessura de 18 mm, material de fácil modelagem e com resistência suficiente para suportar todo peso da fresa, conforme a Figura 1. Para a confecção da estrutura, foi utilizada outra fresa CNC, com a ferramenta fresa tupia de 6 mm, que possibilitou deixar os cortes com precisão e um ótimo acabamento. Para os rasgos e furos menores, utilizou-se uma ferramenta fresa de 2 mm, que possibilitou fazer os furos menores que serviriam para o encaixe dos motores de passo, rebaixo para encaixe dos eixos e rasgos para encaixe das cantoneiras. Para os deslocamentos lineares dos eixos “x, y e z”, foram utilizados tubos de aço galvanizado de 1/2”, rolamentos 608 zz, cantoneiras de alumínio 20 x 20 mm e abraçadeiras do tipo U de 1 1/2 polegadas. Esses materiais tiveram a função de formar os trilhos responsáveis pelos movimentos da fresa, onde os rolamentos fixados nas cantoneiras, e passando pela abraçadeira U, percorrem os tubos, deixando o movimento direcionado e livre.

Figura 1 - Usinagem da placa de MDF



Fonte: Dos autores (2021)

A montagem do sistema de guias foi um ponto crítico no projeto, que requer bastante atenção ao ser executado, porque qualquer medida divergente poderia desalinhar a direção e os rolamentos poderiam sair dos seus trilhos. Essa etapa pode ser vista na Figura 2.

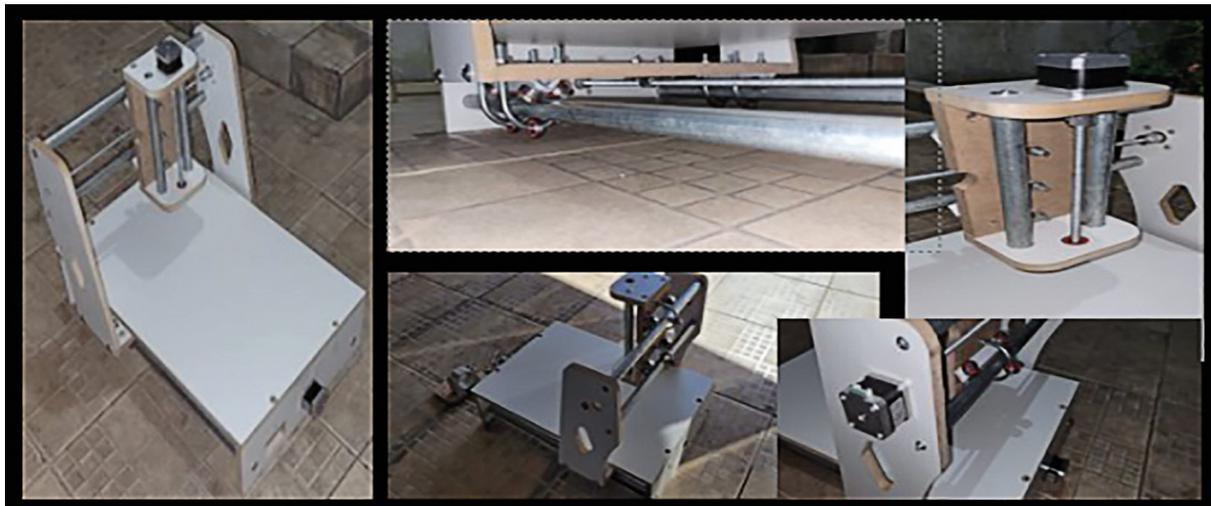
Figura 2 - Guias dos eixos “X, Y, Z”



Fonte: Dos autores (2021)

Observando a Figura 3, pode-se ver que o controle dos eixos está associado à barra roscada, acopladores e os motores de passo. Conforme os motores giram, concêntricos e fixos ao seu eixo, as barras roscadas giram junto, acopladas aos fusos. Um espaçador M8 é fixado às bases X, Y e Z, forçando-as a se movimentar, criando assim os movimentos ordenados dos eixos. Foram utilizados também materiais diversos como elementos de fixação, sendo eles parafusos, porcas e arruelas, com o objetivo de manter a fresa bem fixada para suportar seus movimentos.

Figura 3 - Fresadora em processo de montagem



Fonte: Dos autores (2021)

2.2 Desenvolvimento do sistema embarcado

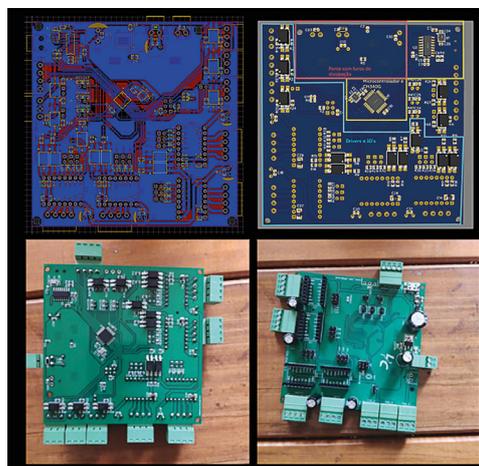
A placa de controle (sistema embarcado) é a parte lógica da CNC. É nela que são processados e executados os comandos dos motores que fazem a máquina funcionar. Como a máquina é compacta, optou-se por também confeccionar a placa de circuito impresso com componentes SMD (*surface-mount device*). A tecnologia utilizada para esses componentes é a SMT (*surface-mount technology*), que permite que sejam desenvolvidas placas de tamanho reduzido, mas que contam com um poder de processamento igual ou maior ao dos componentes convencionais, chamados de PTH (*pin-through hole*).

Para o design eletrônico, foi utilizado um software EDA (*electronic design automation*). No projeto, utilizou-se o EasyEDA para confeccionar o circuito e o desenho da placa de circuito impresso. Segundo Asadi (2022), esse software é uma excelente ferramenta online para desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos (esquemas, simulação e desenvolvimento de placas de circuito impresso).

É importante salientar que o projeto e dimensionamento da placa de circuito impresso (e suas partes) seguem as diretrizes previstas na norma IPC-2221.

O circuito da placa é basicamente dividido em três partes: fonte de alimentação, controlador e drivers. Todo o circuito projetado e montado teve como base o software de controle de máquina GRBL. Na Figura 4, pode-se ver o roteamento da placa, a representação 3D, a divisão dos circuitos e o resultado final da placa de circuito impresso.

Figura 4 - Placa de controle



Fonte: Dos autores (2021)

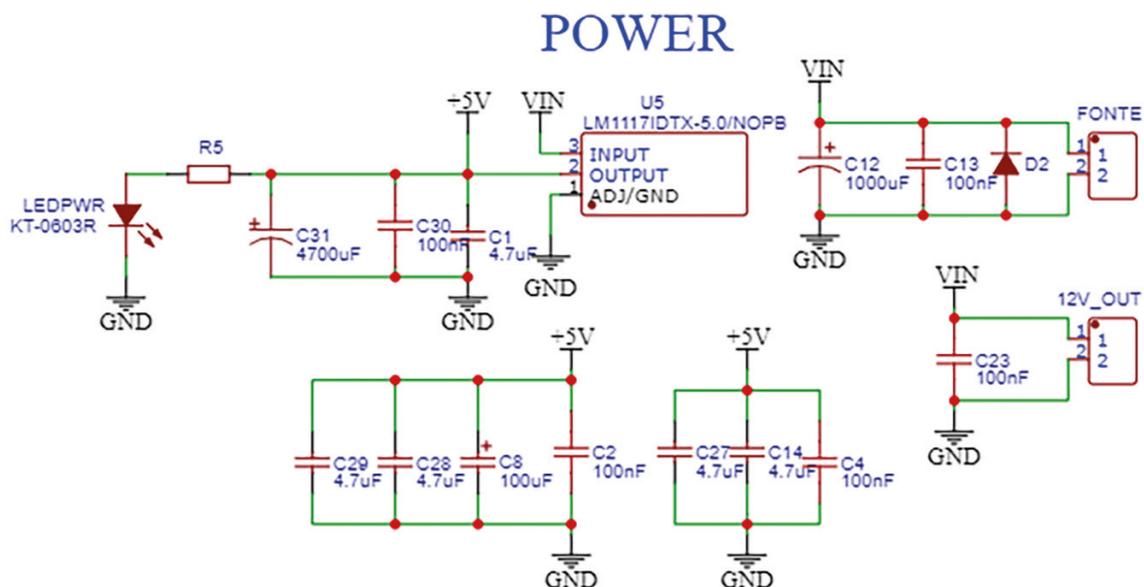
2.2.1 Fonte de alimentação

A fonte de alimentação dos motores é feita em 12 V, porém o microcontrolador é alimentado em 5 V. Devido a esse fato, foi necessário utilizar um circuito redutor de tensão para que fosse alimentado o restante do circuito.

Para gerar esse nível de tensão a partir da fonte primária de 12 V, foi utilizado um o CI LM1117, que tem a função de regulador linear de tensão. Junto ao regulador estão os

capacitores de 100 nF, com a função de filtro de alta frequência, os de 100 uF, na entrada, e 4700 uF, na saída do circuito, como acumuladores de energia, para evitar que ocorra uma queda brusca de tensão quando os motores demandarem muita corrente da fonte, evitando danos ao microcontrolador. O circuito da fonte de alimentação pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Circuito da fonte de alimentação

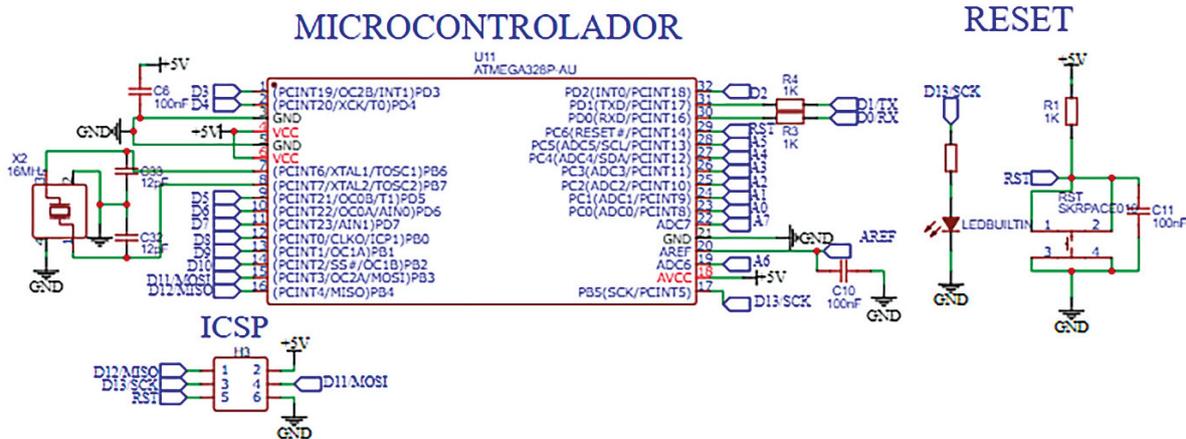


Fonte: Dos autores (2021)

2.2.2 Controlador e USB

O controlador utilizado foi um ATmega328P, com um invólucro QFN48P, que é amplamente utilizado para esse tipo de projeto. Foram projetados todos os componentes necessários para o correto funcionamento do microcontrolador, como cristais osciladores, botões de reset, conectores para gravação do *bootloader* do Arduino, bem como capacitores de desacoplamento. O circuito do microcontrolador e seus demais componentes podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6 - Circuito do microcontrolador



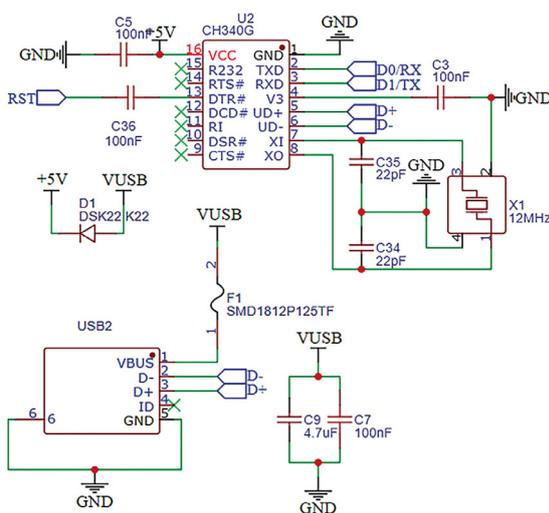
Fonte: Dos autores (2021)

Além do controlador, foi utilizado um conversor de USB para serial (CH340g), que é o padrão de comunicação do μ controlador.

Ele será utilizado para a comunicação entre o computador e a máquina CNC, que tem o seu circuito exemplificado na Figura 7.

Figura 7 - Conversor USB para TTL

USB to UART



Fonte: Dos autores (2021)

Para o circuito integrado funcionar corretamente, de maneira análoga ao circuito do controlador, foram necessários outros compo-

mentes, como cristal oscilador, capacitores de filtro, diodo e fusível para a proteção da placa do computador contra tensão reversa e sobrecarga. Os pinos com a terminação destacada com “X” não foram utilizados. Além das portas de comunicação, foram utilizados os vários pinos do microcontrolador para fazer o controle dos drivers A4988N, que são drivers modulares que foram acoplados na placa para realizar o controle dos motores de passo.

2.2.3 Drivers e IOs

Como relatado anteriormente, os drivers utilizados foram os A4988N, que são módulos facilmente adquiridos em lojas de varejo de eletrônica.

O circuito integrado A4988 é um *microdriver* utilizado para controlar o motor de passo bipolar. Esse driver é interessante, pois ele possibilita utilizar uma tensão de entrada mais alta que a nominal do motor, podendo obter mais torque (AL AMIR *et al.*, 2022).

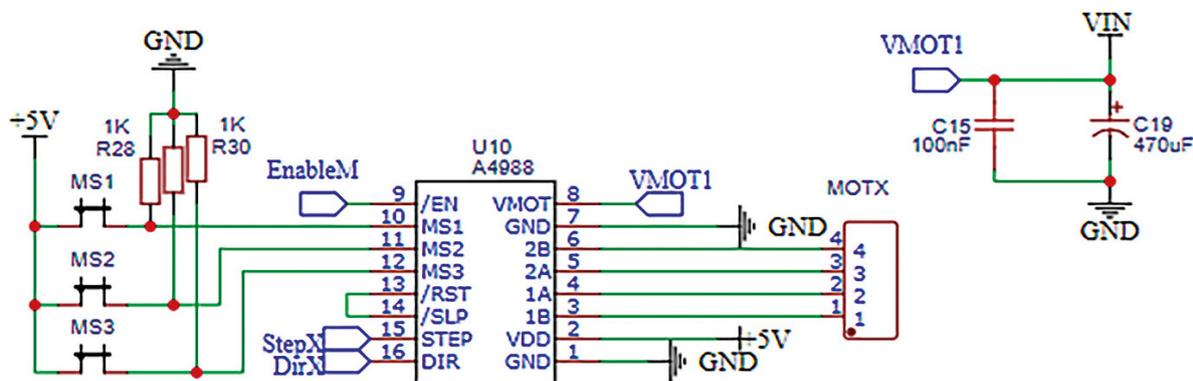
Esses drivers são capazes de movimentar os motores NEMA-17 sem maiores dificuldades e possuem uma boa precisão, pois cada passo do motor pode ser dividido em até dezesseis micropassos.

Optou-se por manter os drivers fora da placa, pois são a primeira barreira contra sobre-corrente, portanto, é o componente mais fácil de ser danificado. Dessa forma, foram projetados conectores fêmea para possibilitar o acoplamento dos drivers na placa, de maneira que facilite o processo de recomposição do sistema caso ocorra a queima do chip do driver, sem a necessidade de uso da solda SMD para substituição.

O circuito dos drivers pode ser observado na Figura 8. São quatro drivers, todos com o mesmo circuito, com duas entradas cada, sendo que os drivers dos motores do eixo Y compartilham a mesma entrada para que trabalhem em sincronia.

De maneira análoga à fonte, há capacitores nos pinos de alimentação de todos os drivers. Isso é necessário, pois, na partida de qualquer motor, há um surto de corrente, o que afundaria a tensão do circuito se não houvesse os capacitores para evitar os efeitos desse transitório no circuito.

Figura 8 - Circuito dos drivers A4988 e seus componentes passivos



Fonte: Dos autores (2021)

Os *jumpers* MS1, MS2 e MS3 servem para definir o modo de resolução da saída. Na tabela abaixo, podem ser observados os valores lógicos de cada jumper e o modo de funcionamento (resolução) para cada combinação.

Tabela 1 - Resolução de acordo com a combinação dos *jumpers*

MS1	MS2	MS3	RESOLUÇÃO
Low	Low	Low	1
High	Low	Low	1/2
Low	High	Low	1/4
High	High	Low	1/8
High	High	High	1/16

Fonte: Dos autores (2021)

Seguindo o mesmo conceito, para proteger o microcontrolador de possíveis surtos de tensão e corrente vindos pelas IOs (entradas e saídas), foram utilizados optoacopladores para isolar galvanicamente todos os pinos do microcontrolador que interagem com estas IOs. Para isso, foi utilizado o circuito integrado PC817, que é um optoacoplador de baixo custo e com frequência de chaveamento rápida o suficiente para que os sinais dos motores sejam transferidos sem perdas (frequência opto > 20 kHz).

Além desses componentes principais, há também entradas para sensores de fim de curso e outras saídas. A placa foi projetada para todos os modos de funcionamento do *firmware*. Das saídas projetadas, podem-se citar:

- Saída *spindle*: utilizada para controlar a velocidade de um *spindle* eletronicamente, se desejado;
- Saída para *cooler*: utilizado para anexar um *cooler* para resfriar os drivers da placa;
- *Coolant/probe*: utilizados para anexar uma bomba de líquido refrigerante e uma ponta de prova que serve para nivelar automaticamente o eixo Z, se necessário.

Não foram utilizadas essas saídas e entradas pelo fato de não serem utilizados materiais que possuem um aquecimento elevado na usinagem, também pelo fato de a refrigeração natural da placa e dos drivers ser suficiente para o funcionamento adequado do circuito.

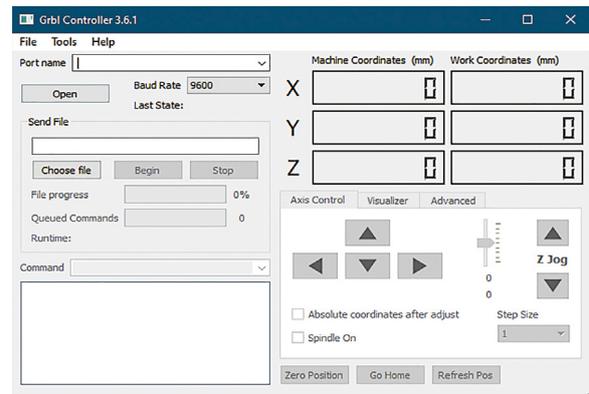
2.3 Software de controle

Para a interface de controle, existem alguns softwares que facilitam a transformação de dados em movimento de máquina. Esses softwares devem ser compatíveis com o μ controlador ATmega328P.

Segundo Bangse *et al.* (2020), o programa G-CODE pode ser processado no software MACH 3, que pode ser gravado nesse controlador. E, de acordo com Patela *et al.* (2019) e Enokela *et al.* (2022), o processo de sincronização dos motores de passo pode ser controlado usando o software GRBL e o Arduino (que utiliza o mesmo controlador aplicado nesse projeto).

Para a interface do controle e execução do *G-code*, foi utilizado o software gratuito chamado GRBL CONTROLLER. Com esse software, é possível enviar os comandos de movimentos via *G-code* e realizar movimentos manuais da fresadora. Para seu correto funcionamento, é necessário parametrizar as informações da fresadora, como seus limites de movimentos e relação de redução mecânica da mesma. A interface pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 - Interface Software GRBL CONTROLLER



Fonte: Dos autores (2021)

2.4 Testes e validação do projeto da fresadora

Após a execução das etapas anteriores, o projeto e execução da fresadora foi concluído e o próximo passo foi realizar os testes, de forma a ajustar os parâmetros finais até que a usinagem se comportasse conforme a ideia proposta. Essa etapa de testes seguiu a seguinte sequência: testes e validação da montagem mecânica, funcionamento da placa de controle, controle dos drivers com os motores de passo e compatibilidade com o software GRBL CONTROLLER.

2.4.1 Teste da estrutura mecânica

O teste mecânico foi elaborado da seguinte forma: com os eixos livres, foram executados diversos movimentos, inserindo peso aos poucos. No primeiro teste, foi visto que os tubos escapavam dos trilhos (rolamentos). Concluiu-se que os tubos estavam com medidas diferentes, o que deixava a fresa fora de esquadro.

O MDF é um material de usinagem rápida, porém é um material não tão rígido quanto o alumínio e o aço. Notou-se, nos testes, que a fresa acabará perdendo rigidez mecânica, podendo ter algumas folgas e desalinhamento ao longo do uso.

Para a correção do problema nos trilhos, seria necessário deixar os tubos com as medidas exatas e, para isso, tivemos que usinar em um torno mecânico, garantindo que as medidas ficassem exatas, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Torneando tubos



Fonte: Dos autores (2021)

Com os tubos nas medidas corretas, observou-se que a estrutura ficou alinhada, os rolamentos não saíram mais dos trilhos e os movimentos ficaram mais leves.

2.4.2 Teste da placa de controle

Como a placa de controle foi desenvolvida e executada pela nossa equipe como um protótipo, ela precisou de algumas alterações durante seus testes. A principal diferença entre a placa confeccionada e os módulos (conhecidos como *shields* – acessórios que podem ser acopladas ao produto para ampliar suas capacidades ou adicionar funcionalidades) encontrados à venda foi a presença de uma isolamento galvânica entre todos os pinos do microcontrolador e as IOs, exceto os da comunicação USB.

Nos testes, os dois principais pontos de atenção para melhoria foram a fonte, que inicialmente não gerou o nível de tensão esperado para a alimentação do controlador nos op-

toacopladores, que não estavam comutando na saída, e no circuito de comunicação USB para TTL, que alimentava o circuito, mas não reconhecia o dispositivo no Windows.

Constatados os defeitos, partiu-se para a resolução dos problemas, que serão descritos no tópico seguinte.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Constatados os defeitos, partiu-se para a resolução dos problemas e novos testes, que estão detalhados nesta etapa.

3.1 Solução de problemas

Fonte de alimentação: para encontrar o defeito, foi utilizado o multímetro; após algumas medições, constatou-se que o componente estava queimado, provavelmente por um sobreaquecimento na hora da solda. Após os testes, foi ressoldado o componente com uma temperatura mais baixa no soldador e utilizando fluxo de solda, de forma a obter um melhor contato com as trilhas e ajudar na refrigeração na hora da solda. Após a troca, a placa voltou a funcionar e a tensão de 5 V de alimentação do microcontrolador e do CH340G permaneceu estável.

Comunicação USB-TTL: inicialmente, como havia o defeito no barramento de 5 V da placa, acreditou-se que o defeito poderia ser ocasionado por uma diferença de potencial entre os 5 V do USB e da placa. Após a ressolda dos componentes da fonte, constatou-se que o defeito não era com relação à fonte de alimentação. Levando isso em consideração, procedeu-se para o teste das trilhas do circuito e, por fim, constatou-se que havia um curto-circuito entre o pino de comunicação D1 e o GND, ocasionado pelo conector USB, que estava em curto. Foi refeita a sol-

da e, assim, o componente fez a comunicação com sucesso com o computador, sem a necessidade de troca do componente.

Optoacopladores: para resolver esses problemas, inicialmente foi analisado o circuito e, após alguns testes, constatou-se que os resistores da base do LED dos optoacopladores eram de um valor muito elevado (1 kΩ), não fornecendo corrente suficiente para o LED e não permitindo a passagem do sinal para o fototransistor. Dessa forma, foram trocados os dois resistores do circuito (o resistor de *pull-up* do sinal era de 470 Ω). Após a troca, a placa começou a funcionar como planejado, pois a corrente de excitação do LED agora era suficiente para que o sinal luminoso interno do optoacoplador fosse detectado pelo fototransistor.

Na Figura 11, pode-se observar o circuito final dos optoacopladores, com todas as mudanças realizadas em cada uma das saídas para os drivers.

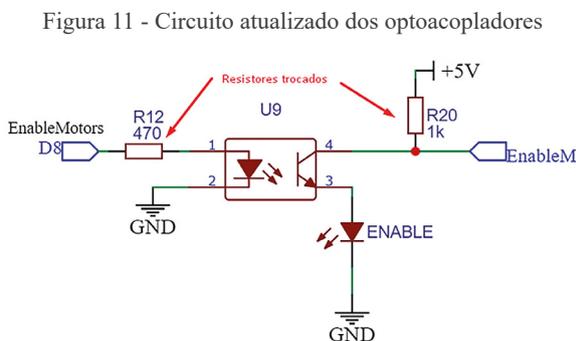


Figura 11 - Circuito atualizado dos optoacopladores

Fonte: Dos autores (2021)

3.2 Teste da comunicação do software com controlador e drivers

Em um primeiro momento, foram acionados os motores de passo de maneira avulsa, independentes da fresa, para assim testar os motores e os controle dos drivers. Dessa forma, verificou-se que alguns motores giravam na direção oposta à que era dado o comando.

Portanto, inverteu-se as bobinas do motor e, assim, os motores giraram no sentido correto.

Após essa validação, foram acoplados os motores nas posições corretas da fresa e foi realizada a configuração do software conforme parâmetros físicos da fresadora.

Com a máquina finalizada, foi obtido um ótimo resultado em um equipamento com as seguintes características: 400 mm de largura, 600 mm de comprimento, 320 mm de altura, com área útil de usinagem de 250 mm no eixo “X”, 460 mm no eixo “Y” e 100 mm no eixo “Z”. Mecanicamente, a máquina ficou robusta e com um bom acabamento, além de conseguir uma precisão de 0,0125 mm/pulso em todos os eixos.

Isso permite construir máquinas com dimensional específico, não se limitando ao dimensional ofertado no mercado.

Na Figura 12, pode-se observar uma foto da montagem final da CNC.

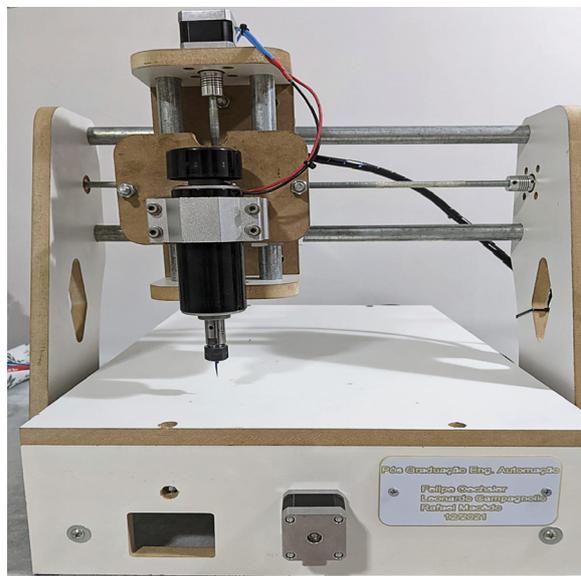


Figura 12 - Montagem final da CNC

Fonte: Dos autores (2021)

A placa de controle, como foi projetada desde seu início com o foco total na fresadora, obteve uma eletrônica confiável, com dimensões reduzidas e de fácil manutenção em caso

de queima de algum componente. O software utilizado foi amigável para configuração e operação do equipamento. A seguir, podem ser vistos, na Tabela 2, os valores aproximados investidos para a fabricação da fresadora.

Tabela 2 - Custos totais da montagem da fresadora

DESCRIÇÃO	VALOR
Madeira MDF	R\$ 100,00
Eixos, rolamentos	R\$ 300,00
Barra roscada, tubos, roldanas, acoplamentos, abraçadeiras	R\$ 200,00
Parafusos, abraçadeira U, porcas, arruelas, contraporcas	R\$ 150,00
Placa de circuito impresso	R\$ 15,00
Componentes eletrônicos em geral	R\$ 30,00
Microcontrolador	R\$ 45,00
Drivers (4X)	R\$ 52,00
Motores de passo (4X)	R\$ 239,20
Spindle	R\$ 275,00
Serviço externo para soldar componentes SMD	R\$ 150,00
TOTAL	R\$ 1.556,20

Fonte: Dos autores (2021)

Cabe ressaltar que a precisão da fresadora foi muito boa, mesmo utilizando o modo *full-step*. Ainda é possível aumentar a precisão, caso seja necessário algum tipo de trabalho que demande um valor maior do que 0,0125 mm.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resultado final da fresadora ficou melhor do que o esperado; porém, sua montagem principalmente na parte mecânica foi muito trabalhosa. Contudo, o custo investido para realizar a fresadora tornou o trabalho vantajoso, tanto pela aplicação dos conhecimentos quanto pelo lado financeiro.

Deve-se salientar que, para a construção da fresadora deste trabalho, conseguiu-se aplicar algumas ferramentas e processos que não aumentaram o valor final da máquina, por serem, em sua maioria, artesanais. Após uma busca rápida na internet, para fins de comparação, pode-se observar, na Tabela 3, o custo de máquinas de mercado que utilizam o mesmo conceito.

Tabela 3 - Comparativos com fresadoras de mercado

DESCRIÇÃO	ÁREA ÚTIL EIXO X	ÁREA ÚTIL EIXO Y	ÁREA ÚTIL EIXO Z	VALOR
Fresadora desenvolvida	250 mm	460 mm	100 mm	R\$ 1.556,20
Fresadora A	400 mm	600 mm	150 mm	R\$ 6.700,00
Fresadora B	880 mm	1170 mm	150 mm	R\$ 8.990,00
Fresadora C	180 mm	270 mm	95 mm	R\$ 7.565,00
Fresadora D	500 mm	500 mm	60 mm	R\$ 11.700,00
Fresadora E	140 mm	180 mm	40 mm	R\$ 3.825,00
Fresadora F	140 mm	190 mm	40 mm	R\$ 2.346,00
Fresadora G	300 mm	180 mm	60 mm	R\$ 4.490,00

Fonte: Dos autores (2021)

Pelos estudos apresentados, é possível visualizar que o equipamento fabricado apresentou ótimos resultados, tanto em relação ao custo quanto ao desempenho. Além disso, permite o ajuste de precisão e o desenvolvimento de fresadoras com dimensionais fora do padrão ofertado pelo mercado. Esse projeto, pelos resultados obtidos, também pode ser utilizado para fins industriais e como base para a criação de outros equipamentos, como *routers* (para a fabricação de placas de circuitos impresso), manipuladores *pick-and-place* (robôs prismáticos), máquinas de corte ou mesmo impressoras 3D.

Vale salientar que o protótipo de placa de circuito impresso desenvolvido também atendeu às demandas do projeto. Em caso de interesse de industrialização em maior escala do projeto, a PCI deve ser revisada para atender aos requisitos da norma internacional IPC-610A (principal referência mundial para definição das indústrias de manufatura eletrônica). Serve para definir posição de componentes para evitar falhas nos processos de solda e montagem de componentes eletrônicos.

REFERÊNCIAS

- ASADI, F. **Electric Circuit Analysis with EasyEDA**. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2022.
- BANGSE, K.; WIBOLO, A.; WIRYANTA, I. K. E. H. Design and fabrication of a CNC router machine for wood engraving. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1450, 012094, pp. 1-6, IOP Publishing, 2020.
- ENOKELA, J. A.; ANFOFUN, O. I. The Development of a Computerized Numerical Control (CNC) Milling Machine. **Spring International Engineering Research Journal**, v. 10, n. 4, pp. 1-7, 2022.
- GOMES, J. C. Construção de fresadora de baixo custo controlada computacionalmente, para aplicações didáticas. **Revista Eixo**, v. 9, n. 2, 2020.
- IPC. **IPC-2221A: Generic Standard on Printed Board Design**. IPC-2221 Task Group, Association Connecting Electronics Industries. Northbrook [IL, USA]: IPC, 2003.
- 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, pp. 1452-1455, 2019.
- POLASTRINI, H. F. **Desenvolvimento de uma máquina CNC de baixo custo com software e hardware abertos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais, Formiga, 2016.
- SHEHATA, Z.; AFASH, H.; SHAHEEN, AL A.; REHMAN, A. UR; RAOUF, A. A. **Design and Development of a Smart Factory** (The Capstone Team Project – MECT/MENG 411). Department of Mechanical Engineering, Eastern Mediterranean University, 2021. Disponível em: <https://me.emu.edu.tr/Documents/CAPSTONE/PAST%20PROJECTS/2020-21%20Spring/SCARA%20ARM%20-%20Report.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2022.
- usuário: VEER, K. V. D. Connecting Grbl. **GitHub** [wiki], 24 abr. 2017. Disponível em: <https://github.com/grbl/grbl/wiki/Connecting-Grbl>. Acesso em: 04 out. 2022.