

PROJETO DE UMA CNC FRESADORA PARA PROTOTIPAGEM DE PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESSOS.

DESIGN OF A CNC MILLING MACHINE FOR PROTOTYPING PRINTED CIRCUIT BOARDS.

DISEÑO DE UNA FRESADORA CNC PARA PROTOTIPOS DE TARJETAS DE CIRCUITO IMPRESO.

Gabriel Henrique de Moraes¹; Claudiner Mendes de Seixas²; Danilo Basseto do Valle³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - moraes.g@aluno.ifsp.edu.br

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - claudiner@ifsp.edu.br

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - danilo.valle@ifsp.edu.br

Resumo: As máquinas CNC's (controladas numericamente por computador), são caracterizadas como operatrizes de alta precisão e atualmente se destacam em produções de peças em escalas industriais, devido ao fato de apresentarem boas vantagens durante o processo de fabricação, visto que são ágeis e eficientes. Este projeto de fresa CNC para prototipagem de placas de circuito impresso tem como principal objetivo, atingir e dimensionar um modelo que seja de baixo custo e acessível, por meio da realização de estudos dos elementos que compõem a máquina e seu funcionamento, assim como a definição de toda a parte mecânica, elétrica e eletrônica, pois são fatores essenciais para seu controle. Para a concepção do projeto, usou-se como referência uma modelagem 3D e análise de softwares CAD (Desenho Auxiliado por Computador)/CAM (Manufatura Auxiliada por Computador), para geração do *G-Code*, sendo possível determinar os parâmetros do desenho. O código (*G-Code*) por sua vez, é importado ao Arduino/CNC Shield, que por sua vez, controlará o sistema de transmissão eletromecânico da máquina, por meio de movimentos da ferramenta fresadora sobre a mesa de trabalho, dando incio a produção da placa de circuito projetada em software. A partir deste projeto, conclui-se que após feito todo o estudo da fundamentação teórica sobre o funcionamento e dimensionamento adequado dos elementos da fresadora, assim como uma modelagem 3D, será possível viabilizar a construção de um protótipo para a prototipagem das placas de circuito impresso.

Palavras-chave: CNC Shield; Controle Numérico Computadorizado; Desenho auxiliado por computador; Fresa CNC; Manufatura auxiliada por computador.

Abstract: CNC machines (computer numerically controlled) are characterized as high-precision tools and currently stand out in the production of parts on industrial scales, due to the fact that they present good advantages during the manufacturing process, as they are agile and efficient. This CNC milling cutter project for prototyping printed circuit boards has the main objective of achieving and sizing a model that is low-cost and accessible, by carrying out studies of the elements that make up the machine and its operation, as well as defining of all mechanical, electrical and electronic parts, as they are essential factors for its control. To design the project, 3D modeling and analysis of CAD (Computer Aided Design) / CAM (Computer Aided Manufacturing) software was used as a reference, to generate the G-Code, making it possible to determine the design parameters. The code (G-Code), in turn, is imported into the Arduino/CNC Shield, which in turn, will control the machine's electromechanical transmission system, through movements of the milling tool on the work table, starting production. of the circuit board designed in software. From this project, it is concluded that after carrying out the entire study of the theoretical basis on the functioning and adequate sizing of the milling machine elements, as well as 3D modeling, it will be possible to build a prototype for prototyping printed circuit boards.

Key words: CNC Shield; Computer Numerical Control; Computer-aided design; CNC milling; Computer-aided manufacturing.

Resumen: Las máquinas CNC (controlado numéricamente por computadora) se caracterizan por ser

herramientas de alta precisión y actualmente destacan en la producción de piezas a escala industrial, debido a que presentan buenas ventajas durante el proceso de fabricación, ya que son ágiles y eficientes. Este proyecto de fresadora CNC para prototipado de placas de circuito impreso tiene como objetivo principal lograr y dimensionar un modelo de bajo costo y accesible, mediante la realización de estudios de los elementos que componen la máquina y su funcionamiento, así como la definición de todos piezas mecánicas, eléctricas y electrónicas, por ser factores esenciales para su control. Para diseñar el proyecto se utilizó como referencia el modelado y análisis 3D del software CAD (Computer Aided Design) / CAM (Computer Aided Manufacturing), para generar el Código G, que permitió determinar los parámetros de diseño. El código (G-Code), a su vez, se importa al Arduino/CNC Shield, que a su vez, controlará el sistema de transmisión electromecánica de la máquina, a través de movimientos de la herramienta de fresado sobre la mesa de trabajo, iniciando la producción de la placa de circuito. diseñado en software. De este proyecto se concluye que luego de realizar todo el estudio de las bases teóricas sobre el funcionamiento y adecuado dimensionamiento de los elementos de la fresadora, así como el modelado 3D, se podrá construir un prototipo para prototipar placas de circuito impreso.

Palabras llave: Escudo CNC; Control Numérico Computadorizado; Diseño asistido por ordenador; fresado CNC; Fabricación asistida por ordenador.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, com o crescimento da inovação e da tecnologia nos setores mecânicos, elétricos e na automação, a exigência e necessidade de precisão e ótimo controle de máquinas controladas numericamente por computadores está cada vez mais alta no processo de fabricação e usinagem de peças, por este motivo, utilizam-se máquinas operatrizes, conhecidas como máquinas CNC (controle numérico computadorizado) ou do inglês *Computer Numeric Control*. Nos sistemas CNC modernos, a concepção dos desenhos de componentes, realização de cortes, traços ou furos são altamente automatizados, através de softwares específicos, responsáveis por este processo. (Fiebig, 2018).

Os sinais gerados pelo software são transmitidos por meio de uma comunicação com os drivers da placa controladora (CNC Shield), que tem o papel de converter tais informações em movimentos mecânicos, por meio dos motores de passo ao terem suas bobinas acionadas de forma controlada, (Neomotion, 2021), sendo responsáveis pela movimentação da ferramenta sobre a mesa de trabalho, ou seja, a ferramenta fresadora, se move ao longo dos eixos X, Y e Z, visto que se trata de uma máquina com três eixos de operação, realizando assim o seu trabalho, como gravações, cortes, e confecções de traços e trilhas.

Entretanto, algumas desvantagens podem ser encontradas nas máquinas CNC, como por exemplo, altos custos comerciais e grandes dimensões que variam de acordo com a aplicação destinadas a elas. Devido a estes motivos se deu a iniciativa de execução deste projeto, pois há a intenção de desenvolvimento de um protótipo com baixo custo, e com dimensões menores quando comparada às CNC's encontradas comercialmente, visto que sua construção será elaborada para a confecção de placas de circuito impreso cuja ferramenta será uma fresa. Um segundo fator importante que deve ser levado em

consideração para o desenvolvimento desta ideia, foi a perspectiva de poder elaborar um projeto funcional que atenda a pequenas empresas que atuam na área de Engenharia Elétrica, oferecendo a oportunidade de confecção de placas de circuito para auxiliar em produções de PCB's (placas de circuito impresso).

Desse modo, este projeto irá constituir uma seleção e descrição do funcionamento geral e dos elementos que compõem uma máquina controlada numericamente por computador, com o intuito de atingir resultados satisfatórios.

2. MÉTODOS E MATERIAIS

Com o intuito de alcançar os objetivos definidos para este projeto e obter resultados acerca da proposta de prototipagem de placas de circuito impresso, em primeiro lugar, por se tratar de uma fresa CNC, foi necessário realizar um estudo específico e descritivo sobre o controle numérico computadorizado e como ele opera, por meio de uma revisão bibliográfica, com a leitura de artigos e trabalhos de conclusão de curso, visando a compreensão do funcionamento geral de uma máquina CNC, da análise e estudo de protótipos já existentes, inclusive produtos comerciais, para que a execução deste projeto seja realizada de forma adequada.

Além disso, a partir da revisão bibliográfica realizada, foi possível compreender os principais elementos pertinentes a estrutura da máquina operatriz, partindo desde sua estrutura mecânica, como todo o sistema elétrico das instalações feitas para que o sistema de controle, eletrônica e eletromecânica possam se comunicar, de forma integrada, visando um manejo controlado, automatizado e estável. É de grande importância esclarecer que todo este planejamento e estudo foi feito pensando-se na aplicação em prototipagem de placas de circuito impresso, conseqüentemente, foram analisadas as formas de fresamento para confecção das trilhas, que podem variar de acordo com as especificações de sua aplicação, diretamente ligada com a espessura das placas de cobre e suas diferentes intensidades de condução de corrente elétrica.

Desta forma, foi possível planejar um modelo de um pré-projeto, sendo desenvolvido através do software AutoCAD 2024, cuja modelagem foi feita em 3D, visando destacar os elementos fundamentais a sua estrutura e facilitar a compreensão de sua operação. Logo após, também foram definidos os componentes e elementos necessários à sua estrutura, para que no futuro, seja construído um protótipo que atenda à necessidade de produzir as placas de circuito. Os elementos e componentes serão listados a seguir.

Mesa de trabalho ou mesa de sacrifício: Perfil estrutural em alumínio 40x40mm para a base e uma chapa de MDF de 15mm para fixação das placas de circuito sobre elas, de modo que seja suficiente para atender as fabricações desejadas. **Material para sustentação**

dos eixos: Estrutura em polietileno, para a construção das torres laterais e fixação dos eixos.

Eixos (X, Y e Z): Para os eixos X e Y serão utilizados 4 eixos lineares de 20mm de espessura com rolamentos lineares ou *Pillow Blocks* (buchas de esferas) de 20mm, assim como seus respectivos mancais para fixação. Já para a construção do eixo Z, será utilizado um fuso esférico com passo de 8mm (TR8 8x400mm) composto também por eixos e rolamentos lineares, garantindo maior estabilidade, precisão e suavidade nos movimentos, visto que a profundidade de fresamento é extremamente importante, este conjunto também será fixado em uma placa de polietileno. **Sistema de movimentação:** correias e polias sincronizadoras GT2, 20 dentes, ambas com 10mm, permitindo que os motores de passo possam atuar sobre as polias e desloque os eixos por meio das correias ao longo das direções de operação da CNC.

Parte elétrica/Eletromecânica: 4 motores de passo NEMA 23, garantindo torque suficiente para esta aplicação, sendo eles do modelo: W523-0240-20-4 (WOTIOM), 4 unidades de chaves fim de curso haste longa, código GV2-G-005, Arduíno UNO r3 e CNC Shield V3 integrados um ao outro, além de 4 unidades do Driver A4988 ou do DRV8825 com seus respectivos dissipadores e Cabo USB para conexão do notebook ou desktop e o Arduíno. **Ferramenta fresadora:** Micro-retífica (135W). **Fonte:** fonte regulável linear (0-12V 10A).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo (Rocha Jr; Kataoka; Silva, 2012, pag. 1, grifo nosso), o controle numérico é uma maneira específica de realizar o controle de sistemas cujo posicionamento é a principal variável para se controlar. A Aeronáutica dos Estados Unidos foi oficialmente reconhecida por fazer uso do CN, na década de 1940, como um mecanismo auxilia em suas atividades, com a proposta de armazenamento de dados e usinar superfícies de aerofólios destinados às aeronaves construídas na época. Neste âmbito, os computadores eletrônicos eram apenas projetos naquele context histórico, entretanto, utilizava-se a tecnologia de cartões perfurados, fitas magnéticas ou perfuradas, além de outras opções disponíveis na época. (Groover, 2008). Com o passar do tempo, obter maior precisão, velocidade e qualidade começaram a ser exigidos, sendo assim, foi desenvolvido o Controle Numérico Computadorizado (CNC), passando a ser o carro chefe da indústria moderna.

Neste âmbito, (Rocha Jr; Kataoka; Silva, 2019, pag. 15, grifo nosso) diz que as máquinas que utilizam desta tecnologia, possuem diversos componentes em sua estrutura do sistema de controle realizados por softwares e processadores existentes, ao invés de arranjos eletromecânicos e eletrônica discreta. (Lyra, 2010, pag 3, grifo nosso) enfatiza que fresadoras convencionais são ferramentas capazes de transformar material bruto em peças

com complexidades geométricas, por meio do controle dos movimentos lineares, eletrônica e computação, passando a ser automatizada, ou seja, através da tecnologia CNC. A operação de uma máquina controlada numericamente por computador acontece por meio de uma sequência de etapas, ou seja, primeiro inicia-se o processo de desenhar em um software CAD (Desenho Auxiliado por Computador), em seguida este desenho é enviado a um programa CAM (Manufatura Auxiliada por Computador), gerando o *G-Code*.

O *G-code* é o nome genérico para a linguagem de programação utilizada para controle de máquinas e ferramentas. Quando um desenho é feito no computador, ele contém informações que precisam ser convertidas para uma linguagem específica que a máquina irá interpretar e entender. Neste caso, o *G-code* é a linguagem atribuída e responsável por essa interpretação, contendo instruções e parâmetros e enviados a controladora, para que a ferramenta execute o processo. (Polastrini, 2016). Na figura 1 (Oliveira, 2019), será exemplificado um diagrama para esclarecimento das principais etapas do funcionamento geral de uma CNC.

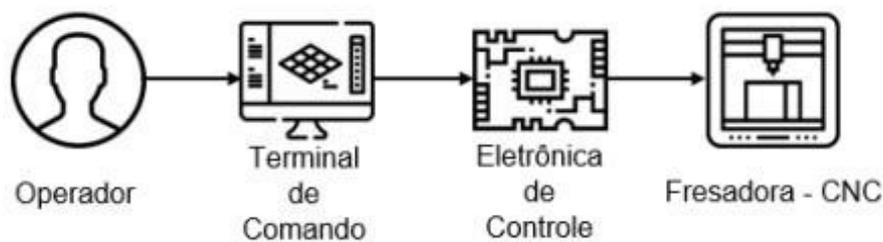


Figura 1 – Diagrama de operação de uma máquina CNC.

Fonte: Oliveira, 2019.

Na figura (1), resumiu-se as quatro principais etapas da operação básica de uma fresadora CNC, ou seja, em primeiro lugar, o operador definirá o trabalho a ser executado, sendo elaborado no terminal de comando (computadores ou notebooks), através dos softwares CAD/CAM. Este trabalho, por exemplo, trilhas de uma placa de circuito, assim como seus respectivos furos para fixação de componentes elétricos, serão transformados em linhas de código, na linguagem *G-code*, sendo importado a um firmware GBRL na IDE do Arduino. A função da terceira etapa é interpretar os dados do código, realizado pelo Arduino e transferidos a Shield CNC, que neste caso, será a placa controladora utilizada, onde os sinais digitais do Arduino serão convertidos em tensões e correntes elétricas, por meio dos driver's de potência, como visto na figura (2).

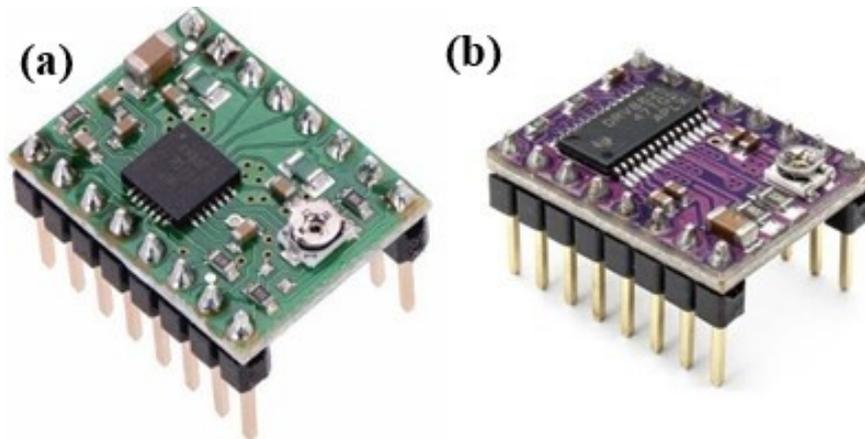


Figura 2 – Driver A4988 (a) e driver DRV8825 (b).

Fonte: Eletrogate, 2023.

Estes driver's são acoplados a controladora, para a ativação e controle da parte eletromecânica (motores de passo). Para finalizar o diagrama da figura (1), a última etapa será o resultado dos movimentos que os motores de passo irão realizar sobre o sistema de movimentação dos eixos X, Y e Z. Para uma CNC composta por 3 eixos de operação, a ferramenta fresadora irá se posicionar em coordenadas X e Y por meio de movimentos horizontais, ao passo que o eixo Z irá se deslocar verticalmente, de modo que ele faça o ajuste da altura da ferramenta sobre a placa em confecção. Os eixos podem ser caracterizados por fusos e em guias lineares, formando um plano espacial de três dimensões. (Reis et al., 2018).

Este processo de fresamento é considerado como um processo de usinagem mecânica, destinado para trabalhar em diversas superfícies com a utilização de ferramentas adequadas, variando de acordo com o tipo de superfície e aplicação, de modo geral, serão utilizadas ferramentas multicortantes. A vantagem do fresamento é a possibilidade de se usinar peças fixas a uma mesa de trabalho, o que a difere do torneamento, que é executado em usinagem por revolução. (Lyra, 2010) Afirma que o fresamento pode ser distinguido em dois tipos. O primeiro tipo é o fresamento cilíndrico tangencial, mais indicado e utilizado para aplicações em que se deseja obter superfícies planas paralelas ao eixo de rotação da ferramenta. Já o segundo método é caracterizado por fresamento frontal, geralmente é um método utilizado em superfícies planas e perpendiculares ao eixo de rotação.

Para as confecções de trilhas em placas de circuito impresso, é recomendado o uso do segundo método, por ser o mais usual e prático, partindo do ponto de vista que ao se deslocar a ferramenta de forma perpendicular ao plano, será possível confeccionar as trilhas

e realizar os furos, além de que o movimento de avanço proporcionará a variação de altura ao longo do eixo Z, utilizando por exemplo uma broca helicoidal de topo. (Moreira, 2018, pag. 44, grifo nosso), diz que ao se conhecer os valores de corrente em relação a largura das trilhas da placa, de acordo com a intensidade de corrente que fluirá por elas, pode-se estabelecer diferentes larguras de trilhas para as placas utilizadas na prototipagem. A tabela (1) demonstra as relações determinadas.

Tabela 1. Capacidade de condução de corrente que circulará para algumas espessuras de trilhas em diferentes placas de cobre.

Largura da trilha (mm)	Corrente para cobre	
	0,0347mm (A)	0,0684mm (A)
5	0,5	0,7
10	0,8	1,4
20	1,4	2,2
30	1,9	3,0
50	2,5	4,0
100	4,0	7,0

Fonte: Moreira, 2018.

De modo geral, as CNC's fresadoras colaboram muito na fabricação ágil, promovem qualidade e praticidade para a prototipagem de placas de circuito impresso, de forma automatizada. Estes benefícios podem proporcionar aos seus usuários uma ferramenta de trabalho acessível e viável para a utilização em atividades e pesquisas. Porém, como este estudo faz uma abordagem teórica do projeto em desenvolvimento, é necessário especificar os aspectos construtivos desta máquina, para um pré-projeto, dito isso, através das pesquisas e revisões bibliográficas, foi elaborada uma modelagem 3D de toda a sua estrutura, para que futuramente o protótipo seja desenvolvido e construído de acordo com a modelagem realizada neste estudo.

De início, a mesa de trabalho ou mesa de sacrifício é definida como plana e retangular, contando com quatro apoios laterais, para sustentação e fixação dos eixos X e Y e seus mancais, estes eixos serão responsáveis pelos movimentos horizontais, por meio dos *Pillow Block's*. Já o eixo Z, é caracterizado por um conjunto de elementos, sendo um fuso esférico com sua castanha metálica para deslocamento, acompanhado de um par de guias lineares com seus respectivos rolamentos (*Pillow Blocks*). Desse modo, essa descrição e planejamento dos eixos, proporciona a ideia de uma CNC com três eixos de operação, sendo suficiente para a prototipagem das placas de circuito, como ilustra a figura (3), com vista em perspectiva do projeto em 3D elaborado pelo pesquisador.

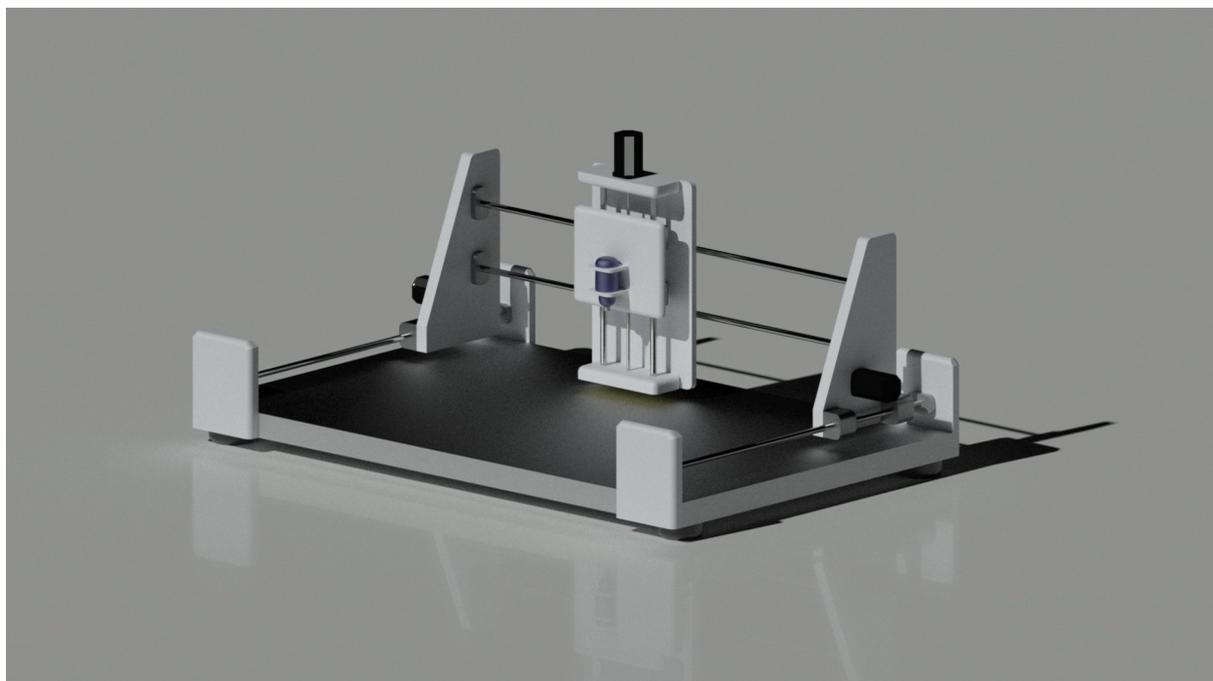


Figura 3 – Vista em perspectiva frontal da máquina CNC.

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Além dos eixos descritos e acoplados nas torres laterais, é possível observar o sistema eletromecânico, que neste caso, são os motores de passo, responsáveis pela movimentação dos eixos, através da combinação do conjunto de correias e polias sincronizadoras. Todo este processo será executado pelo sistema de controle, através do conteúdo gerado no computador e convertido em dados, para que possam ser enviados ao Arduino, importando-os a Shield CNC (controladora), composta por 4 drivers acoplados em sua estrutura responsáveis pela ativação e comando dos motores de passo, pois um driver irá se responsabilizar pelo eixo X, dois para o eixo Y e um para o Z. É de grande importância ressaltar que a alimentação deste sistema é mantida por uma fonte regulável linear de 0Vcc-12Vcc, 10A, visto que este tipo de motor suporta até 2A e 8,6V por fase. Este tipo de fonte apresenta poucos ruídos em suas formas de onda, garantindo a estabilidade do funcionamento da CNC.

Para melhor visualização da composição estrutural da CNC desenvolvida no AutoCAD 2024, também é registrada uma vista em perspectiva da parte traseira, onde é possível observar os motores de passo e os *Pillow Block's* para deslocamento ao longo dos eixos X e Y, assim como a parte traseira do conjunto estrutural do eixo Z, descrito anteriormente,

ilustrada pelas figura (4).



Figura 4 – Vista em perspectiva traseira da máquina CNC.

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Agora, enfatizando as partes pertinentes ao projeto, porém de forma separada, observa-se os conjuntos (1) e (2), da figura (5), isoladamente. O conjunto (1) é basicamente um par de guias lineares com seus respectivos mancais nas extremidades, estes guias são responsáveis pelo deslocamento na direção Y da ferramenta fresadora quando a CNC é vista de frente, ou seja, ele proporcionam o movimento de ir para frente ou para trás. Por outro lado, o conjunto (2) é constituído por vários elementos, como pode ser visto, destacada em azul, há uma ferramenta fresadora, que neste caso, foi escolhida uma micro-retífica, responsável pela fabricação das trilhas e furos, de acordo com os movimentos estabelecidos pelos eixos.

Além da micro-retífica, pode-se ver que há um par de guias lineares e um fuso esférico ao centro do conjunto estrutural do eixo Z, isso promove precisão e controle para que o “desenho” das trilhas e furos sejam o mais preciso possível. Este deslocamento de altura ocorre devido a atuação do motor de passo localizado na parte superior ao conjunto, definindo velocidade e altura para o processo de fresamento. Todos estes elementos estão fixados de forma unificada e integrada, em partes de material polietileno, desenhadas e

planejadas pelo pesquisador deste projeto, como ilustra a figura (5) logo abaixo.

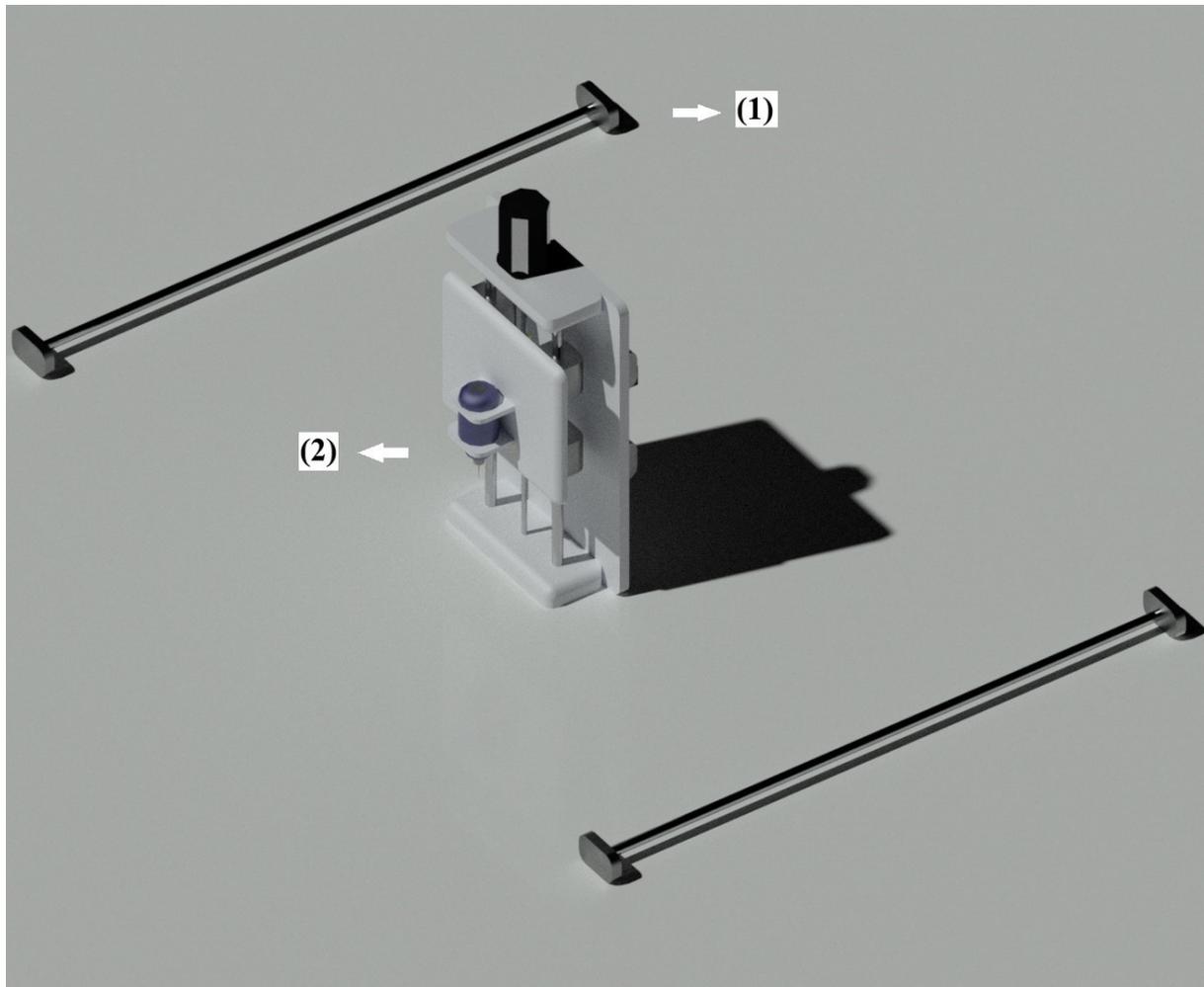


Figura 5 – Eixos Y (1) e Conjunto estrutural do eixo Z (2).

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Além do motor localizado no topo do eixo Z, ainda há um segundo motor na parte traseira do conjunto, que pode ser visualizado através da figura (4), este motor traseiro é o responsável pela movimentação ao longo do eixo X, ou seja, quando vista de frente, a ferramenta irá se mover para a direita ou para a esquerda.

Por fim, a última figura da modelagem elaborada pelo pesquisador, exibe tanto a mesa de trabalho ou também chamada de mesa de sacrifício, conjunto (4), constituída por perfis de alumínio em formato de uma base retangular, para a fixação da chapa, utilizada como chapa de sacrifício, além de possuir os quatro apoios laterais em polietileno, para a fixação dos eixos Y (conjunto (1)). Além da mesa, também foram isoladas as torres laterais, juntamente com os pares de eixos que compõem o eixo X, quando vista de frente, assim como os *Pillow Blocks* e motores de passo, fixados unilateralmente para reforço do

movimento no sentido do eixo Y. Todo este conjunto descrito é representado por (3), encontrado na figura (6).

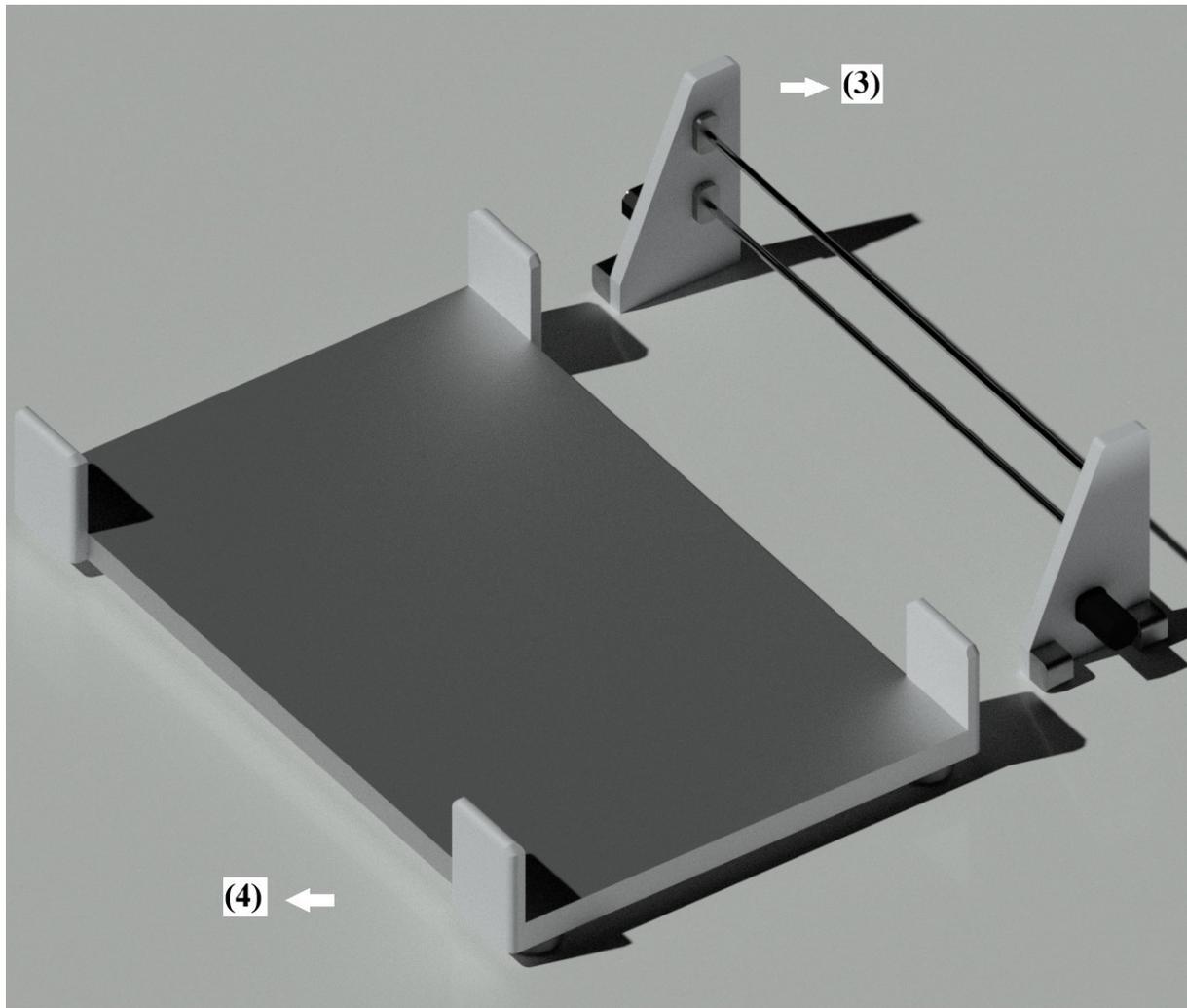


Figura 6 – Torres com o eixo X (3) fixado à ela e Mesa de sacrifício (4).

Fonte: Próprio Autor, 2023.

Assim, de modo geral, há uma ampla e útil área de trabalho disponível para a confecção de placas de circuito impresso, onde a ferramenta fresadora (micro-retífica), fixada no eixo Z, poderá atuar em qualquer uma das três direções deste plano especial devido a estrutura mecânica elaborada para esta CNC fresadora, podendo atender a necessidades de pequena empresas da área de Engenharia Elétrica e Eletrônica, além de atender demandas de produção de forma eficiente e de baixo custo.

4. CONCLUSÃO

Portanto, foi desenvolvido um projeto de baixo custo em relação aos produtos comerciais já existentes, proporcionando inovação e incentive de uma proposta de continuidade do projeto, cujo objetivo é construir um protótipo, contribuindo com um design de baixo custo e suficiente para produção de placas de circuito impresso, despertando o interesse de pequenas empresas da área, pois acessibilidade, custos e eficiência são extremamente importantes em produções em Escala automatizada. Destaca-se que possíveis melhorias e adaptações podem ocorrer, melhorando a execução do protótipo, já com a integração do sistema de controle, desenhos e manufaturas auxiliados por computador e confecção de placas de circuito impresso de modo eficaz e rápido.

5. CONTRIBUIÇÕES

C.M.S e D.B.V contribuíram na concepção do projeto e orientação durante seu desenvolvimento. G.H.M atuou na redação, pesquisa e desenvolvimento do trabalho. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Votuporanga, pela oportunidade, por meio do programa PIBIFSP (Programa Interno de Bolsa do Instituto Federal de São Paulo), ao orientador e colaborador pelo suporte e ao Grupo de Pesquisa em Automação e Inovação – GPAI.

REFERÊNCIAS

ELETROGATE. Catálogo de produto: Driver Motor de Passo A4988 com Dissipador de Calor. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/driver-motor-de-passo-a4988-c-dissipador-de-calor>. Acesso em: 21 out. 2023.

ELETROGATE. Catálogo de produto: Driver Motor de Passo DRV8825. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/driver-motor-de-passo-drv8825>. Acesso em: 21 out. 2023.

FIEBIG, R. **Protótipo de um CNC Router**. 2018. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 2018.

LYRA, P. V. A. **Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática**. 2010. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2010.

M. P. Groover, Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing. Upper Saddle River: Pearson, 2008.

MOREIRA, Pedro Henrique Soares. **Projeto e implementação de fresa CNC de baixo custo para confecção de trilhas de circuito impresso**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NEOMOTION. Datasheet de produto: Motores de passo. Disponível em: <https://www.neomotion.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Cat%C3%A1logo-Datasheet-dos-motores-de-passo-R01.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2023.

OLIVEIRA, F. B. **Projeto, construção e caracterização de uma fresadora CNC de bancada**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2019.

P. A. S. Rocha Jr., V. S. Kataoka, R. D. S. E. Silva, and M. E. L. Tostes, "Planejamento de Trajetória Aplicado a uma Máquina de Controle Numérico Computadorizado," Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012, 2012.

POLASTRINI, F. H. **Desenvolvimento de uma máquina CNC de baixo custo**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Formiga, Formiga, Minas Gerais, 2016.

REIS, Aparecido Donizete da Silva et al. **PROJETO DE MÁQUINA CNC 3 EIXOS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Fundação Educacional de Ituverava, 2018.

ROCHA JÚNIOR, Paulo Augusto Sherring et al. Projeto e implementação de um sistema de controle numérico computadorizado: trajetórias suaves através da limitação de snap. 2019.