



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ARTHUR TEODÓSIO BORBA

**RECUPERAÇÃO DE FRESADORA CNC: MODIFICAÇÕES NO PROJETO COMERCIAL  
PARA REABILITAR MÁQUINA PARADA DO DEPARTAMENTO**

Recife  
2023

ARTHUR TEODÓSIO BORBA

**RECUPERAÇÃO DE FRESADORA CNC: MODIFICAÇÕES NO PROJETO  
COMERCIAL PARA REABILITAR MÁQUINA PARADA DO DEPARTAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Márcio Evaristo da Cruz Brito

Recife  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Borba, Arthur Teodósio.

Recuperação de fresadora CNC: modificações no projeto comercial para reabilitar máquina parada do departamento. / Arthur Teodósio Borba. - Recife, 2023.

83 p : il., tab.

Orientador(a): Márcio Evaristo da Cruz Brito

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. CNC. 2. GRBL. 3. Usinagem. 4. Robótica. 5. Manufatura auxiliada por computador. I. Brito, Márcio Evaristo da Cruz. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ARTHUR TEODÓSIO BORBA

**RECUPERAÇÃO DE FRESADORA CNC: MODIFICAÇÕES NO PROJETO  
COMERCIAL PARA REABILITAR MÁQUINA PARADA DO DEPARTAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 27/09/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Márcio Evaristo da Cruz Brito  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Gustavo Medeiros de Souza Azevedo (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Jeydson Lopes da Silva (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho ao meu pai, Murici de Menezes Borba, e ao meu avô, José Edmilson da Purificação, ambos marceneiros que sempre trabalharam com marcenaria e móveis de madeira em geral, de onde veio o sustento da minha família que possibilitou que eu cursasse o ensino superior em uma universidade como a UFPE. Através deste trabalho, espero aprender o suficiente sobre máquinas CNC para ser capaz de em breve construir uma fresadora CNC para ajuda-los na fabricação de itens usinados em madeira, dando assim uma aplicabilidade voltada à profissão que me possibilitou chegar onde eu cheguei, através da profissão que eu escolhi para mim, como Engenheiro de Controle e Automação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado, me fortificado e me guiado ao longo de toda a minha vida, para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço também a minha mãe, Cristiana Teodósio de Menezes Borba, meu pai, Murici de Menezes Borba, e meu irmão, André Teodósio Borba, que são a minha fortaleza e minha maior motivação para concluir a graduação e lhes deixar orgulhosos.

Agradeço também aos colegas de curso, que se tornaram grandes amigos ao longo dos anos, sem os quais eu teria desistido da graduação a muito tempo, em especial: Beatriz Ramos, Clarissa Gusmão, Matheus Cordeiro, Jaylton Alencar, Danilo Santos, Leonardo Conte, Igor Pinheiro e Genilson José.

Agradeço também ao meu primo Wesllen de Oliveira Borba e ao meu grande amigo Júlio Pedro da Silva Júnior, com quem eu dividi moradia ao longo destes anos em Recife por conta das nossas graduações, com quem eu dividi muitas alegrias, tristezas, anseios e realizações.

Agradeço também aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE, em especial ao meu orientador, Márcio Evaristo, e também a Rafael Cavalcanti, Douglas Contente e Fabrício Bradaschia, os quais me deram apoio, conhecimento e orientação ao longo desta graduação.

“O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são”. Aristóteles

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um projeto de recuperação e melhoria de uma fresadora CNC, utilizando componentes disponíveis no mercado nacional. Esta máquina pertence ao Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFPE, e após adquirida, apresentou uma série de defeitos que acarretaram na sua inoperabilidade. A máquina em questão se trata de uma fresadora CNC de pequeno porte, projetada para fazer usinagem em placas de fenolite ou fibra de vidro, para a confecção de placas de circuito impresso (PCIs), largamente utilizadas nas áreas da engenharia Elétrica, Eletrônica, Biomédica e de Controle e Automação. No desenvolvimento do trabalho, foram levantadas as funções essenciais a serem feitas pela máquina e a partir disso, decidiu-se quais as partes do projeto original que seriam mantidas e quais seriam modificadas, visando a sua melhoria. Optou-se por aproveitar parte da estrutura mecânica original, devido a sua construção robusta, e complementá-la com um eixo vertical que amplia consideravelmente o horizonte de possibilidades de usinagens com esta fresadora. Já o sistema eletrônico e de controle foram completamente modificados. Feito todo o trabalho de pesquisa, projeto, aquisição de materiais, montagem, parametrização e testes da máquina, na análise dos resultados concluiu-se que o projeto foi bem sucedido, pois a máquina foi capaz de confeccionar PCBs com um grau de precisão satisfatório para as aplicações usuais, e está novamente à disposição do DEE para contribuir com o desenvolvimento do ensino e pesquisa.

**Palavras-chave:** CNC. GRBL. Usinagem. Robótica. Manufatura Auxiliada por Computador.

## **ABSTRACT**

The present work introduces a recovery and enhancement project for a CNC milling machine, utilizing components available in the national market. This machine belongs to the Department of Electrical Engineering (DEE) at UFPE, and after its acquisition, it exhibited a series of defects that rendered it inoperable. The machine in question is a small-scale CNC milling machine, designed for machining phenolic or fiberglass boards, for the fabrication of printed circuit boards (PCBs), widely used in the fields of Electrical Engineering, Electronics, Biomedical Engineering, and Control and Automation. During the course of this project, the essential functions to be performed by the machine were identified. Based on this, decisions were made regarding which parts of the original design would be retained and which would be modified, with the aim of improvement. It was chosen to retain a portion of the original mechanical structure due to its robust construction and to complement it with a vertical axis that significantly expands the range of machining possibilities with this milling machine. However, the electronic and control systems were completely overhauled. After conducting research, design, material procurement, assembly, parameterization, and testing of the machine, upon analyzing the results, it was concluded that the project was successful. The machine was capable of producing PCBs with a satisfactory degree of precision for typical applications, and it is once again available to the DEE to contribute to the advancement of education and research.

**Key-words:** CNC. GRBL. Machining. Robotics. Computer Aided Manufacturing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fresadora do DEE em sua versão original de fábrica. ....	17
Figura 2: Fita Perfurada utilizada nas primeiras máquinas de Controle Numérico. ....	20
Figura 3: Torno CNC. ....	22
Figura 4: Fresadora CNC do DEE-UFPE. ....	22
Figura 5: Gravadora a <i>LASER</i> CNC. ....	23
Figura 6: Impressora 3D. ....	24
Figura 7: Eixos cartesianos de uma CNC vista de frente. ....	25
Figura 8: Fresadora CNC do tipo pórtico móvel. ....	26
Figura 9: Fresadora CNC do tipo mesa móvel. ....	27
Figura 10: Eixo linear retificado com <i>pillow blocks</i> e suportes nas extremidades. ....	28
Figura 11: Eixo linear retificado suportado com <i>pillow blocks</i> abertos. ....	29
Figura 12: Guia linear com patins em corte mostrando as esferas. ....	30
Figura 13: Polia e correia dentada. ....	31
Figura 14: Cremalheira e Pinhão. ....	32
Figura 15: Fuso trapezoidal TR8 com castanha anti-folga. ....	33
Figura 16: Fuso de esferas com castanha em corte mostrando as esferas. ....	34
Figura 17: Motor de passo padrão NEMA 34 de 35 Kgf.cm. ....	35
Figura 18: Esquemas de ligação de motor de passo com 4, 5, 6 e 8 fios. ....	37
Figura 19: Motor <i>Spindle</i> de corrente contínua. ....	38
Figura 20: Arduino Uno Rev3 com módulo ATMEGA328p embarcado. ....	40
Figura 21: CNC Shield V3 para Arduino. ....	41
Figura 22: ESP32-DevKitC V4 com módulo ESP32-WROOM-32 soldado. ....	42
Figura 23: Exemplo geração de um sinal analógico utilizando a técnica de PWM. ....	43
Figura 24: Driver de Micropassos TB6600. ....	46
Figura 25: Chave fim de curso Micro Switch. ....	47
Figura 26: Máquina CNC deste trabalho em sua versão original. ....	51
Figura 27: Fresadora deste trabalho aquando do início do projeto. ....	52
Figura 28: Sistema de transmissão do eixo X. ....	53
Figura 29: Sistema de transmissão e guias do eixo Y. ....	54
Figura 30: Placa principal do eixo Z aquando do início do projeto. ....	54
Figura 31: Placa principal do eixo X aquando do início do projeto. ....	55

Figura 32: Projeto do novo Eixo Z feito no SketchUp. ....	56
Figura 33: Vista expandida do novo Eixo Z. ....	57
Figura 34: Motor de passo original da Fresadora. ....	58
Figura 35: Motor de passo 23KM-C051-07V no eixo X com o dissipador de calor. ..	58
Figura 36: <i>Spindle</i> original da Fresadora. ....	59
Figura 37: <i>Spindle</i> CC utilizado como nova ferramenta de trabalho. ....	60
Figura 38: Esquema de ligações dos dispositivos elétricos neste trabalho. ....	60
Figura 39: <i>Driver</i> de micropassos M5256. ....	61
Figura 40: Tampa do Driver M5256. ....	62
Figura 41: <i>Pinout</i> da placa ESP32 Dev Kit C V1. ....	63
Figura 42: Chave fim-de-curso do eixo X. ....	63
Figura 43: Projeto da Placa de controle desenvolvida para a fresadora. ....	65
Figura 44: Configuração dos pinos da ESP32 para o GRBL. ....	66
Figura 45: Primeiros testes feitos de gravação em MDF. ....	70
Figura 46: Projeto de PCB para teste feito no ARES Proteus. ....	71
Figura 47: Tela do FlatCAM com os arquivos Gerber abertos. ....	72
Figura 48: Tela do Candle com o <i>G-Code</i> do primeiro percurso de gravação. ....	73
Figura 49: Ligações feitas para o uso do probe. ....	74
Figura 50: Mapa de altura criado a partir da sonda de autonivelamento. ....	75
Figura 51: Resultado final da PCB criada. ....	75
Figura 52: Projeto eletrônico da placa de controle, desenvolvido no ARES Proteus. ....	81
Figura 53: Diagrama elétrico da placa de controle, desenvolvido no ISIS Proteus. ..	82
Figura 54: Arquivo de configuração da pinagem da ESP32 para o GRBL. ....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre Arduino UNO e ESP32 DevKit C.....	42
Tabela 2: Principais diferenças entre os drivers A4988 e DRV8825. ....	45
Tabela 3: Dados para o motor de passo 23KM-C051-07V.....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D.....	Três Dimensões
ADC.....	Analog-to-Digital Converter
AVR.....	Automatic Voltage Regulator
CA.....	Corrente Alternada
CAD.....	Computer Aided Design
CAM.....	Computer Aided Manufacturing
CC.....	Corrente Contínua
CN.....	Controle Numérico
CNC.....	Controle Numérico Computadorizado
CPU.....	Central Processing Unit
DAC.....	Digital-to-Analog Converter
DEE.....	Departamento de Engenharia Elétrica
EDA.....	Electronic Design Automation
GPIO.....	General Purpose Input/Output
I2C.....	Inter-Integrated Circuit
IDE.....	Integrated Development Environment
IoT.....	Internet of Things
LASER.....	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
NEMA.....	National Electrical Manufacturers Association
PCB.....	Printed Circuit Board
PCI.....	Placa de Circuito Impresso
PEAD.....	Polietileno de Alta Densidade
PETG.....	Polietileno Tereftalato Glicol
PWM.....	Pulse Width Modulation
SD.....	Secure Digital
SoC.....	System-on-a-Chip
SPI.....	Serial Peripheral Interface
UART.....	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UC.....	Unidade de Controle
UFPE.....	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	RELEVÂNCIA DO TRABALHO .....	16
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO .....	16
1.3	OBJETIVOS.....	17
1.3.1	Geral.....	17
1.3.2	Específicos .....	17
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
2.1	DEFINIÇÃO DE UMA MÁQUINA CNC .....	19
2.1.1	Controle Numérico (CN) .....	20
2.1.2	Controle Numérico Computadorizado (CNC).....	21
2.2	PRINCIPAIS TIPOS DE MÁQUINAS CNC .....	21
2.2.1	Torno CNC.....	21
2.2.2	Fresadora CNC.....	22
2.2.3	Máquina a LASER CNC.....	23
2.2.4	Impressora 3D .....	23
2.3	ESTRUTURA MECÂNICA .....	24
2.3.1	Modelos Estruturais .....	24
2.3.1.1	<i>Pórtico Móvel</i> .....	25
2.3.1.2	<i>Mesa Móvel</i> .....	26
2.3.2	Sistemas de Guias.....	27
2.3.2.1	<i>Eixo Linear Retificado</i> .....	27
2.3.2.2	<i>Eixo Linear Retificado Suportado</i> .....	28
2.3.2.3	<i>Guia Linear com Patins</i> .....	29
2.3.3	Sistemas de Transmissão.....	30
2.3.3.1	<i>Correia Dentada</i> .....	30
2.3.3.2	<i>Cremalheira</i> .....	31
2.3.3.3	<i>Fuso Trapezoidal</i> .....	32
2.3.3.4	<i>Fuso de Esferas</i> .....	33
2.3.4	Motor de Passo.....	34
2.3.5	Spindle.....	37
2.4	ELETRÔNICA.....	38
2.4.1	Microcontroladores .....	38

2.4.1.1	Arduino .....	40
2.4.1.2	ESP32 .....	41
2.4.2	PWM .....	43
2.4.3	Drivers para Motores de Passo .....	44
2.4.4	Chaves Fim de curso .....	46
2.5	SOFTWARE/FIRMWARE .....	47
2.5.1	G-Code .....	47
2.5.2	GRBL .....	48
2.5.3	G-Code Sender.....	49
2.5.4	Modelagem das Placas .....	50
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....</b>	<b>51</b>
3.1	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	52
3.2	ESTRUTURA MECÂNICA .....	53
3.2.1	Eixos X e Y .....	53
3.2.2	Eixo Z .....	54
3.2.3	Motores de passo .....	57
3.2.4	Spindle.....	59
3.3	ELETRÔNICA.....	60
3.3.1	Alimentação elétrica .....	61
3.3.2	Drivers .....	61
3.3.3	Microcontrolador .....	62
3.3.4	Fins-de-curso.....	63
3.3.5	Filtragem de ruídos.....	64
3.3.6	Placa Desenvolvida .....	64
3.4	SOFTWARE/FIRMWARE.....	65
3.4.1	GRBL ESP32.....	65
3.4.2	Parametrização do GRBL .....	66
<b>4</b>	<b>TESTES.....</b>	<b>70</b>
4.1	PROTEUS .....	71
4.2	FLATCAM.....	71
4.3	CANDLE .....	72
4.4	PROBLE .....	74
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE .....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A história da humanidade é marcada pela constante evolução e aprimoramento de ferramentas que facilitam tarefas essenciais para a sobrevivência e o progresso. Embora muitas dessas tarefas, como cortar madeira, pintar paredes e confeccionar utensílios de pedra, tenham raízes antigas, os métodos e ferramentas utilizados mudaram significativamente ao longo dos séculos. A busca por eficiência e precisão impulsionou inovações engenhosas, como os moinhos de vento, o motor à vapor e motor elétrico. Essa constante evolução reflete o desejo da humanidade de simplificar a vida e superar desafios.

Um exemplo notável dessa evolução é o Controle Numérico (CN), que surgiu na década de 1960. Essa tecnologia utiliza instruções codificadas para automatizar tarefas em máquinas, inicialmente na manufatura. Com o advento dos computadores, o CN evoluiu para Controle Numérico Computadorizado (CNC), impulsionando a 3ª Revolução Industrial. As máquinas CNC revolucionaram a fabricação e a prototipagem, tornando-se acessíveis a empresas e entusiastas devido ao seu custo e facilidade de uso. Essas máquinas oferecem precisão e eficiência na produção de peças complexas e personalizadas, estimulando a criatividade e a inovação em diversos setores (ORLANDO e FILHO, 2021).

No campo da engenharia elétrica e eletrônica, as fresadoras CNC desempenham um papel crucial na fabricação de Placas de Circuito Impresso (PCIs, ou PCBs, do inglês *Printed Circuit Board*). As PCBs são fundamentais para a eletrônica moderna, permitindo a integração de circuitos complexos em uma única placa. A utilização de CNC para produzir PCBs oferece precisão e detalhamento excepcionais, resultando em circuitos eletrônicos com desempenho otimizado e livre de erros (SANCHES e PEREIRA, 2017).

Em comparação com métodos convencionais, como a montagem manual, a utilização de PCBs fabricadas em fresadoras CNC garante maior confiabilidade, durabilidade e eficiência em dispositivos eletrônicos. A capacidade de criar trilhas e pads personalizados possibilita a incorporação de circuitos complexos em um espaço compacto, impulsionando a inovação no campo da eletrônica (SANCHES e PEREIRA, 2017).

## 1.1 Relevância do trabalho

As máquinas CNC são peças-chave para a evolução da indústria, contribuindo para a melhoria da qualidade, eficiência, flexibilidade e inovação nos processos de fabricação. Elas capacitam as empresas a se tornarem mais competitivas, produtivas e ágeis, impulsionando o desenvolvimento econômico e tecnológico de diversos setores. Desta forma, o projeto e construção de uma máquina CNC constitui-se em um exercício valioso e relevante de aplicação prática das técnicas e conceitos aprendidos durante o curso. Além de, um desafio significativo por se tratar de atividade multidisciplinar, que envolve principalmente, eletrônica, ciência da computação e mecânica de precisão e disciplinas específicas, tais como, linguagem de programação de robôs, desenvolvimento de *firmware* e protocolos de comunicação.

## 1.2 Justificativa do trabalho

O DEE-UFPE possui uma fresadora CNC, mostrada na Figura 1, adquirida de uma empresa alemã com o objetivo de confeccionar PCBs para auxiliar no ensino, pesquisa e desenvolvimento de projetos. Atualmente, essa máquina encontra-se danificada, devido a um defeito ocasionado pela falha prematura de um componente (abordado adiante no trabalho). O custo para o reparo da mesma pelo fabricante é muito elevado, devido a diversos fatores, tais como, custo dos componentes, serviços e a necessidade de envio da máquina para outro país, tornando essa opção economicamente inviável.

A máquina possui três eixos e o defeito afeta apenas um, levando-se em conta que a construção e os componentes utilizados são de alta qualidade, enxergou-se a possibilidade de preservar a estrutura mecânica dos eixos íntegros, construir um terceiro eixo para substituir o danificado, tendo como premissa utilizar apenas componentes disponíveis no mercado nacional, além disso, se faz necessário, substituir toda parte eletrônica, uma vez que a existente foi projetada especificamente para controlar a máquina original. Desta forma, este trabalho foca no projeto, construção e instalação do terceiro eixo e no projeto, construção e calibração da parte eletrônica, o que constitui um desafio e uma oportunidade de aprendizagem valiosa.

Figura 1: Fresadora do DEE em sua versão original de fábrica.



Fonte: (LPKF, 2011).

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Geral

Adaptar a estrutura mecânica para um terceiro eixo e criar um novo sistema eletrônico de controle para uma fresadora CNC para a confecção de placas de circuito impresso.

### 1.3.2 Específicos

- Modificar o motor *spindle* da fresadora por um encontrado no mercado nacional;
- Modificar o eixo Z da máquina para um que seja possível controlar a altura da ferramenta de trabalho;
- Substituir os Motores de Passo e Drivers originais por outros disponíveis no mercado nacional;
- Projetar e confeccionar uma nova plataforma de controle para a máquina utilizando uma ESP32 com o *firmware* GRBL;
- Parametrizar o *software* de controle para se adequar às características mecânicas da máquina, como passos por milímetros e limites de movimentação;
- Testar a máquina, validar o trabalho e analisar os resultados.

## **1.4 Organização do Trabalho**

O primeiro capítulo traz uma introdução ao projeto por meio de uma contextualização do tema “Máquinas CNC”, expondo a relevância e justificativa do trabalho feito, além dos objetivos a serem alcançados e a organização do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura, que serve como fundamentação teórica para dar bases para que o leitor compreenda o desenvolvimento do trabalho.

O terceiro capítulo expõe a forma como foi desenvolvido o trabalho, desde os materiais escolhidos, as mudanças realizadas e o desenvolvimento das soluções.

O quarto capítulo apresenta os procedimentos realizados para a realização de testes de validação do projeto, bem como resultados obtidos com os mesmos.

O quinto capítulo traz as conclusões embasadas em tais resultados, as considerações finais acerca do projeto e a viabilidade de possíveis propostas de continuidade para o trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Uma máquina CNC possui um grau de complexidade considerável, uma vez que trabalha com o deslocamento espacial em 2 ou 3 dimensões de partes móveis da máquina, sendo para isto, alimentadas e controladas por circuitos eletrônicos.

Portanto, para compreender de forma satisfatória o desenvolvimento deste trabalho, faz-se necessária uma abordagem prévia de temas como: o que é uma máquina CNC e os tipos de máquinas existentes.

Restringido o tema para as fresadoras CNC, deve-se compreender o básico sobre a estrutura mecânica da máquina (desde os modelos estruturais, sistemas de guias e de transmissão, motores que dão movimento à máquina, à ferramenta utilizada para usinar o material), sobre o sistema eletrônico (microcontroladores, *drivers*, ligações elétricas e dispositivos de segurança utilizados) e sobre a plataforma de controle da fresadora (os *softwares*, *firmwares*, e arquivos utilizados para dar os comandos pertinentes à fresadora).

### 2.1 Definição de uma Máquina CNC

Uma máquina CNC é uma máquina utilizada para realizar operações de usinagem, corte, gravação, pintura, solda, impressão, entre outras, com precisão e de forma automatizada, fazendo uso de um sistema de controle chamado Controle Numérico Computadorizado (BARRETO, 2018).

Essas máquinas são largamente utilizadas na indústria manufatureira, especialmente na produção de peças complexas em grandes quantidades. Elas oferecem várias vantagens em comparação com as máquinas de mesma função, porém de operação manual, como maior precisão, repetibilidade, automação e velocidade de produção. Além disso, a capacidade de programação por computador permite a criação rápida e flexível de novos projetos e alterações nos existentes (GROOVER, 2008).

### 2.1.1 Controle Numérico (CN)

O Controle Numérico é uma inovação tecnológica que teve sua origem nos Estados Unidos durante a década de 1950. Essa tecnologia opera por meio de uma série de instruções codificadas, que são empregadas para enviar comandos precisos a um sistema de controle. Esse processo permite efetivamente supervisionar e direcionar o funcionamento de diversas máquinas industriais, incluindo tornos, fresadoras, máquinas de corte e outras utilizadas na manufatura (SMID, 2003).

Com esta tecnologia, era possível programar máquinas para trabalharem na produção contínua de peças, fabricadas com alto grau de precisão e repetibilidade, quando comparado com as máquinas operadas manualmente. Nesta tecnologia, as instruções eram passadas através de fitas perfuradas, como mostrado na Figura 2. Devido à natureza mecânica da codificação registrada nessas fitas, a possibilidade de intervenção por um programador para realizar alterações era inviável. Quando surgia a necessidade de modificar a sequência de instruções da máquina, uma nova fita precisava ser fabricada. Esse cenário impulsionou a demanda por uma tecnologia de controle mais flexível, capaz de oferecer um grau superior de mutabilidade (SMID, 2003).

Figura 2: Fita Perfurada utilizada nas primeiras máquinas de Controle Numérico.



Fonte: (MCCRANIE, 2022)

### **2.1.2 Controle Numérico Computadorizado (CNC)**

O Controle Numérico Computadorizado, por sua vez, é uma evolução do Controle Numérico, sendo também um sistema automatizado utilizado para controlar e operar máquinas utilizadas em manufatura, porém, a sequência de instruções é enviada e interpretada por um microprocessador, e, portanto, pode ter sua programação facilmente alterada em um intervalo de tempo bastante reduzido, quase instantâneo (SMID, 2003).

O sistema CNC apresenta três componentes essenciais: o computador de controle, que aloja tanto o *software* quanto o *hardware* necessários para processar e efetuar os comandos do programa; os drivers de acionamento, responsáveis por controlar os motores e, por conseguinte, os deslocamentos dos eixos da máquina; e, por fim, os sensores e atuadores, os quais supervisionam e proporcionam retorno acerca do estado da máquina. (SMID, 2003).

## **2.2 Principais Tipos de Máquinas CNC**

O sistema CNC pode ser empregado em diferentes tipos de máquinas, projetadas para realizar as mais variadas atividades em manufatura: usinagem, corte, solda, pintura, impressão, entre outras. Adiante estão alguns dos tipos mais comuns de máquinas CNC encontradas no mercado:

### **2.2.1 Torno CNC**

Um torno CNC, como o mostrado na Figura 3, é uma máquina projetada para usinagem rotativa, onde a peça de trabalho gira enquanto a ferramenta de desbaste se move ao longo do eixo da peça. Isso permite, além da usinagem em peças, a realização de operações de corte, torneamento, faceamento, retífica, perfuração, rosqueamento, chanframento e muitas outras, dependendo das ferramentas disponíveis e das configurações do torno (GROOVER, 2008).

Figura 3: Torno CNC.

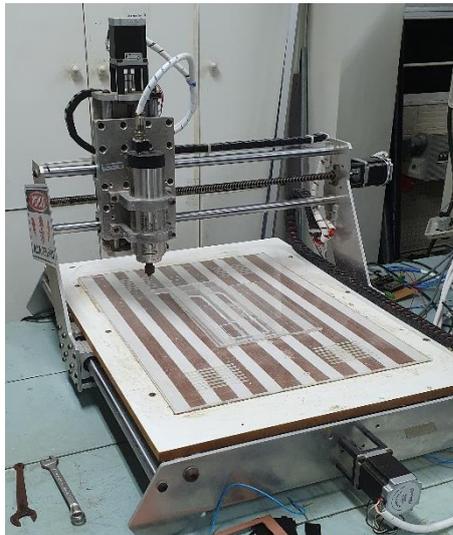


Fonte: (AUTOMAÇÃO, 2023).

### **2.2.2 Fresadora CNC**

Uma fresadora CNC é uma máquina que utiliza uma ferramenta de usinagem rotativa a altas velocidades (fresa) para remover material de uma peça de trabalho. A fresa também pode ser utilizada para usinar peças por golpe e gravações com ferramentas diamantadas. São capazes, portanto, de realizar operações como usinagem, corte, perfuração, escareamento e rosqueamento (SCHMID e KALPAKJIAN, 2013). Na Figura 4 é mostrada uma máquina deste tipo.

Figura 4: Fresadora CNC do DEE-UFPE.



Fonte: (AUTOR, 2023).

### 2.2.3 Máquina a LASER CNC

Uma gravadora LASER CNC é uma máquina que utiliza um LASER de alta potência para cortar ou fazer gravações em materiais, como metal, madeira, plástico e tecido. As máquinas de corte a LASER CNC são amplamente utilizadas na indústria de corte e gravação de precisão (como a máquina mostrada na Figura 5), uma vez que o raio LASER na maioria dos casos, oferece um corte mais preciso que um objeto de desbaste, como a de uma fresa em uma fresadora CNC (CHIANG e RAMOS, 1994).

Figura 5: Gravadora a LASER CNC.



Fonte: (AMAZON, 2023).

### 2.2.4 Impressora 3D

Uma impressora 3D é uma máquina que utiliza a tecnologia de fabricação aditiva para criar objetos tridimensionais camada por camada. Ao contrário das impressoras tradicionais, que usam tinta para imprimir em papel, as impressoras 3D utilizam materiais como plástico (como a máquina mostrada na Figura 6), metal, cerâmica, resina e outros materiais. Nela, a impressão acontece à medida que a cabeça de impressão faz a deposição camada por camada do material fundido, e este rapidamente se solidifica, dando a forma do objeto a ser confeccionado (CUNICO, 2015).

Figura 6: Impressora 3D.



Fonte: (TOUCH, 2023).

## 2.3 Estrutura Mecânica

Por se tratar de máquinas utilizadas em processos de fabricação, em sua maioria industriais, é de suma importância que estas tenham uma estrutura mecânica robusta o suficiente para suportar os esforços mecânicos presentes no decorrer da sua operação (como por exemplo, suportar o peso da ferramenta de trabalho) e ajustadas o suficiente para não perder a precisão (como por exemplo, não ter folgas nem desalinhamentos).

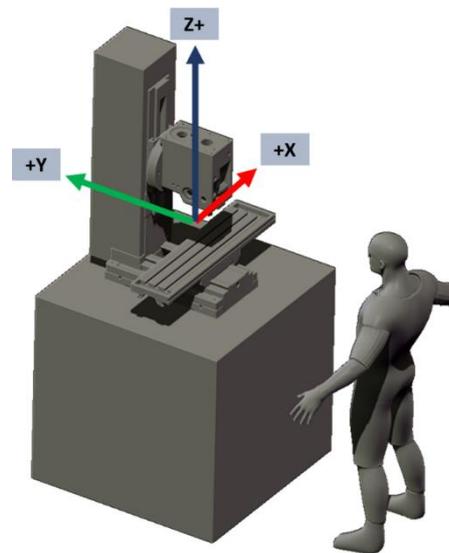
Esta seção traz alguns dos elementos mais importantes da estrutura mecânica de uma máquina CNC: os modelos estruturais, os sistemas de transmissão e de guias, os motores utilizados para dar movimento à máquina e a ferramenta de trabalho.

### 2.3.1 Modelos Estruturais

Uma máquina CNC pode ter diferentes modelos estruturais, como o modelo em Delta e o modelo Antropomórfico, no entanto, o modelo mais difundido é o modelo Cartesiano, no qual a máquina CNC tem o seu movimento ao longo de 3 eixos ortogonais entre si, tal como em um sistema cartesiano (OLIVEIRA, 2022).

Os projetistas, fabricantes e usuários deste modelo de CNC utilizam a nomenclatura já consagrada dos eixos cartesianos para se referir aos eixos da máquina, sendo o padrão mais comumente adotado o ilustrado na Figura 7, no qual tendo a máquina vista de frente, o eixo X é aquele que move o cabeçote para a direita e para a esquerda, enquanto que o eixo Y é aquele que move o cabeçote para frente e para trás e o eixo Z para cima e para baixo na vertical (ESPINEL, 2023).

Figura 7: Eixos cartesianos de uma CNC vista de frente.



Fonte: (ESPINEL, 2023).

Este modelo é largamente utilizado pela sua simplicidade, tanto em construção quanto em compreensão da movimentação do cabeçote da máquina ao longo do seu espaço de trabalho. Neste modelo, há duas principais variações de estrutura: o pórtico móvel e a mesa móvel (SILVA, 2018).

#### 2.3.1.1 Pórtico Móvel

Na máquina com pórtico móvel, o movimento do cabeçote ao longo do eixo Y se dá através da movimentação de todo o pórtico que sustenta os eixos X e Z, como na máquina mostrada na Figura 8. Uma grande vantagem desta configuração, é que as

partes móveis não excedem os limites físicos da mesa de trabalho, portanto, é adequada para locais em que o espaço é limitado (SILVA, 2018).

No entanto, apresenta a desvantagem de possibilitar maior probabilidade para folgas, uma vez que os 3 eixos ficam sobrepostos, portanto, qualquer folga presente no eixo Y pode ser refletida nos eixos X e Z, comprometendo assim a precisão da máquina (SILVA, 2018).

Figura 8: Fresadora CNC do tipo pórtico móvel.



Fonte: (PROJETOS, 2023).

### 2.3.1.2 Mesa Móvel

Já a máquina com mesa móvel, por sua vez, o pórtico que sustenta os eixos X e Z fica estático na estrutura da máquina, é a mesa de trabalho que se move ao longo do eixo Y. Esta configuração apresenta a desvantagem de a movimentação da mesa fazer com que esta ultrapasse os limites da estrutura da máquina, dificultando a sua alocação em ambientes com espaço limitado, sendo necessário um espaço de aproximadamente o dobro do que ocupa a máquina com a mesa centralizada, para permitir a sua plena movimentação. É por conta desta característica que máquinas CNC de maior porte normalmente são do tipo pórtico móvel, pois não seria viável ter que disponibilizar um espaço ainda maior do que o que a mesa já ocupa para acondicionar a máquina (SILVA, 2018).

Por sua vez, devido ao pórtico estar fixado, o movimento no eixo Y não impacta nos eixos X e Z, portanto, este modelo apresenta uma rigidez maior, quando

comparado a uma máquina de pórtico móvel, sendo mais indicado para máquinas na qual a precisão é imprescindível, como mostrado na pela Figura 9.

Figura 9: Fresadora CNC do tipo mesa móvel.



Fonte: (FTSHOPPING, 2023).

### **2.3.2 Sistemas de Guias**

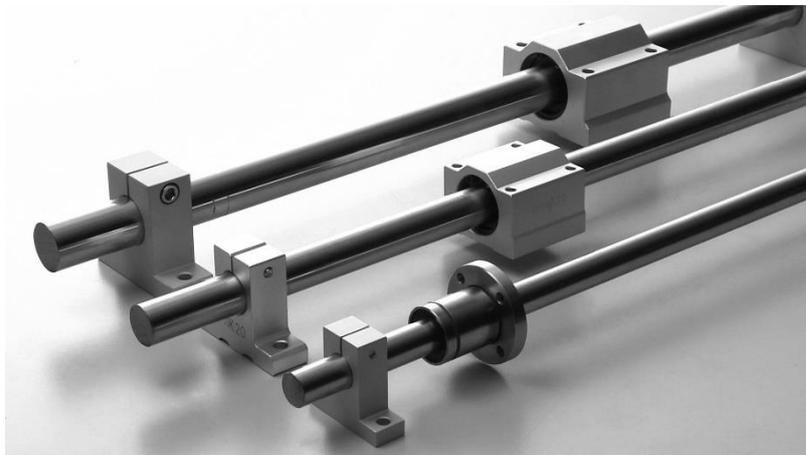
Para que uma máquina consiga fazer a movimentação mecânica necessária para a realização da atividade para qual foi projetada, é imprescindível o uso de guias para garantir que estes movimentos ocorram no espaço e na direção desejada, sem desvios. Considerando-se máquinas CNC cartesianas, o sistema de guias adotado deve garantir o movimento retilíneo ao longo dos eixos, a ortogonalidade entre tais eixos, a sustentação das partes que se moverão ao longo delas, a precisão e a suavidade do movimento, evitando ao máximo os atritos que dificultam o deslocamento.

#### **2.3.2.1 Eixo Linear Retificado**

O sistema linear com Eixo Linear Retificado, mostrado na Figura 10, é composto por um eixo de formato cilíndrico retificado, normalmente feito em aço (e muitas vezes temperado e cromado), preso pelas extremidades por suportes fixados na estrutura da máquina e percorridos por rolamentos lineares encapsulados em blocos metálicos, conhecidos como *Pillow Blocks*.

Este sistema é bastante eficaz pois, a rigidez do aço temperado permite ao eixo conferir à máquina tanto a sustentação das partes móveis da máquina quanto linearidade do movimento das mesmas, uma vez que estão fixadas nos *pillow blocks*. São largamente utilizados em máquinas CNC e em outros sistemas mecânicos, por cumprirem bem a função como guia e possuir um custo mais baixo que outras opções do mercado, como por exemplo, as guias lineares com patins (KALATEC, 2023).

Figura 10: Eixo linear retificado com *pillow blocks* e suportes nas extremidades.



Fonte: (KALATEC, 2023).

### 2.3.2.2 Eixo Linear Retificado Suportado

O Eixo Linear Retificado Suportado é composto por um eixo linear retificado fixado sobre um apoio (normalmente feito em alumínio e em formato de “T”, como mostrado na Figura 11), e vem a ser uma variação que busca corrigir o maior problema do uso dos eixos sem tal apoio: a deflexão sofrida pelo eixo por conta da força peso exercida pelas partes móveis da máquina. O princípio de funcionamento é o mesmo da versão do eixo sem suporte, atentando para o fato de que para este modelo, os *pillow blocks* são abertos (possuindo rolamentos lineares abertos em seu interior) para poder deslizar sem colidir no suporte em T. Por ser uma versão melhorada, são naturalmente mais caros que os eixos sem suporte, no entanto, além do ganho de precisão por serem resistentes à deflexão, dispensam o uso de suportes nas extremidades uma vez que o suporte do eixo já possui furos para fixação na estrutura,

sendo assim, apresentam um melhor custo-benefício, quando comparado aos eixos lineares comuns e às guias lineares com patins.

Figura 11: Eixo linear retificado suportado com *pillow blocks* abertos.



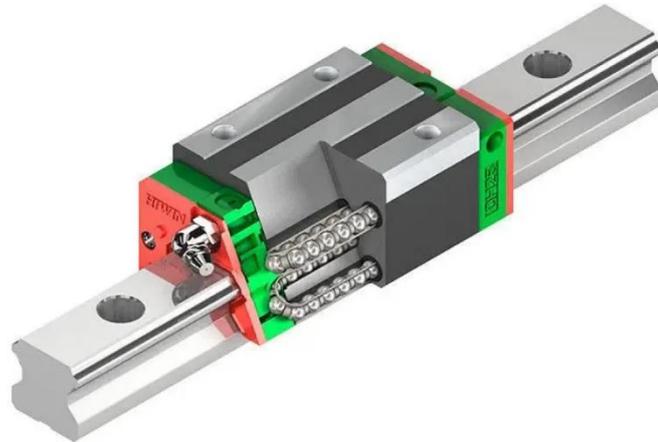
Fonte: (AMAZON, 2023).

### 2.3.2.3 Guia Linear com Patins

Já o sistema de Guias Lineares com Patins é considerado o mais completo para aplicações com movimento linear, e está presente nas máquinas mais robustas e precisas encontradas na indústria e na manufatura. O sistema é composto por uma guia que tem um formato que lembra um trilho de um trem e serve de caminho para um bloco deslizante, comumente chamado de “patins” (pelo fato deste deslizar com muita suavidade ao longo da guia), que serve de ponto de fixação para as partes que serão movimentadas ao longo da guia (MECTROL, 2023). A Figura 12 mostra um exemplo deste sistema, com o patim em corte mostrando as esferas em seu interior.

Os patins das guias lineares são altamente ajustados para se encaixarem no trilho, possuindo uma folga quase zero, ao mesmo tempo que seus rolamentos ou esferas internas garantem um deslizar suave com pouquíssimo atrito. Além disso, o formato do trilho confere ao arranjo uma fixação muito segura, e, portanto, uma capacidade de carga altíssima, quando comparado com outros sistemas de guia de mesma dimensão (MECTROL, 2023). Todas essas vantagens vêm atreladas a um custo mais elevado, fazendo com que projetistas e fabricantes muitas vezes optem por sistemas mais baratos, visando um melhor custo-benefício.

Figura 12: Guia linear com patins em corte mostrando as esferas.



Fonte: (MECTROL, 2023).

### **2.3.3 Sistemas de Transmissão**

Para que a máquina possa executar o seu trabalho, suas partes (cabeçote, pórtico, mesa) precisam se mover ao longo dos eixos. Este movimento se origina nos motores distribuídos pela estrutura da máquina, de forma rotativa, portanto, precisa ser convertido em movimento linear e transmitidos para os pontos de interesse, causando assim o movimento na máquina ao longo dos seus eixos.

Existem vários mecanismos de transmissão utilizados em máquinas CNC, com os principais sendo: correia dentada, cremalheira, fuso trapezoidal e fuso de esferas. Cada um destes mecanismos apresenta suas particularidades que os diferem quanto à precisão, agilidade, capacidade de carga, ganho mecânico, entre outros.

#### **2.3.3.1 Correia Dentada**

Na transmissão via correia dentada, uma correia com várias cavidades (chamados popularmente de dentes) é esticada por meio de polias fixadas nas extremidades de um eixo da máquina, de forma que seus “dentes” se encaixam de forma ajustada (SUTILLI, 2014). A correia é presa à parte móvel da máquina, enquanto uma polia é acoplada ao eixo do motor e a outra é livre para girar. Desta forma, à medida que o motor movimentava uma polia, o movimento da correia move a parte da máquina presa a ela.

Este conjunto é muito utilizado em vários sistemas de transmissão mecânica pela sua simplicidade e baixo custo quando comparado a outros mecanismos, como fusos e cremalheiras. No entanto, para a utilização em máquinas CNC, existem algumas desvantagens como a precisão, que pode ser comprometida por folgas e desalinhamentos, e também a capacidade de carga inferior à de outros mecanismos. Outra limitação deste mecanismo é na utilização em um eixo vertical, uma vez que a flexibilidade natural que possui a correia somada ao encaixe não rígido dos seus dentes nas polias, permite a existência de folgas, logo não confere a rigidez mecânica necessária para sustentar a máquina-ferramenta de trabalho frente à ação da gravidade. Isto explica a utilização deste mecanismo apenas em eixos horizontais (X e Y). A Figura 13 mostra um exemplo de conjunto com polia e correia dentada.

Figura 13: Polia e correia dentada.



Fonte: (AMAZON, 2023).

### 2.3.3.2 Cremalheira

Neste sistema de transmissão mostrado na Figura 14, uma cremalheira, que é uma barra dentada, é acionada por um pinhão, que é uma engrenagem que vai acoplada ao eixo do motor. A interação entre os dentes do pinhão e da cremalheira permite que o movimento rotativo do pinhão seja convertido em movimento linear ao longo da cremalheira, que pode tanto estar fixa quanto móvel na estrutura da máquina. O pinhão pode ser cilíndrico, trabalhando em conjunto com cremalheiras lineares, ou pode ser cônico, quando esta última tiver o formato circular (LI, WANG, *et al.*, 2021).

Uma das principais vantagens da transmissão por cremalheira é a capacidade de transmitir grandes forças e torque, proporcionando uma alta capacidade de carga. Além disso, a transmissão por cremalheira é conhecida por sua precisão de posicionamento, estabilidade e eficiência. No entanto, é importante considerar que o contato direto dos dentes é muito agressivo, sendo importante realizar uma lubrificação adequada para garantir o desempenho e a vida útil do sistema (LI, WANG, *et al.*, 2021).

Figura 14: Cremalheira e Pinhão.



Fonte: (TECMAF, 2023).

### 2.3.3.3 Fuso Trapezoidal

Na transmissão por fuso trapezoidal, uma castanha (que é uma porca projetada para ser fixada nas partes móveis da máquina) percorre um fuso (que é uma barra rosqueada, como um parafuso) à medida que este gira em torno do seu próprio eixo, convertendo assim o movimento rotativo do fuso em movimento linear da castanha ao longo da direção do fuso (OLIVEIRA, 2020).

Uma das principais características do fuso trapezoidal é a forma trapezoidal dos filetes da rosca, que proporciona uma alta precisão, rigidez, eficiência de transmissão e capacidade de carga quando comparados à transmissão com correias. Este formato trapezoidal oferece uma boa resistência à movimentos não intencionais (movimentações entre a castanha e o fuso sem que haja rotação do eixo do motor), logo, são ideais para serem utilizados em eixos verticais, uma vez que, a depender do

ângulo de inclinação dos filetes da rosca, dificultam que a castanha se mova pelo fuso apenas pela ação da gravidade. Além disso, o fuso trapezoidal é relativamente fácil de fabricar e possui baixo custo em comparação com outros sistemas de transmissão linear robustos, como o de fusos de esferas. Devido a estas características, os fusos trapezoidais são largamente utilizados em máquinas CNC, pois equilibram bem as necessidades mecânicas da máquina com um custo acessível para a maioria dos projetistas de máquinas que utilizem este sistema (OLIVEIRA, 2020).

Dentre as desvantagens deste sistema estão as folgas entre os filetes do fuso e da castanha, que reduzem a precisão da operação. Estas folgas podem ser reduzidas aumentando a força de contato entre a castanha e o fuso, através de leves desalinhamentos propositais entre o fuso e o alojamento da castanha, ou ainda com castanhas de duas seções que possuem uma mola interna para forçar a castanha contra os filetes do fuso, como mostrado na Figura 15. Esse ganho em precisão, é compensado com um maior desgaste físico das partes, sendo essencial realizar uma boa lubrificação para prolongar a vida útil destes componentes.

Figura 15: Fuso trapezoidal TR8 com castanha anti-folga.



Fonte: (CNC, 2023).

#### 2.3.3.4 Fuso de Esferas

Já na transmissão por fuso de esferas, bastante similar ao que ocorre em um fuso trapezoidal, uma castanha também percorre um fuso ao longo do seu comprimento. Porém, neste conjunto a castanha não é simplesmente uma porca, esta

contém esferas metálicas em seu interior, e estas esferas percorrem pelos filetes do fuso, que tem um formato arredondado, de forma bastante ajustada e suave (STOICA e STAN, 2021). A Figura 16 mostra este conjunto, com a castanha em corte.

Desta forma, assim como o fuso trapezoidal, o fuso de esferas oferece um movimento muito preciso, com alta capacidade de carga, normalmente mais veloz, e com um desgaste reduzido, que aumenta a vida útil do equipamento. Por conta disto, o fuso de esferas é mais caro que o fuso trapezoidal, o que justifica este não ser tão majoritariamente utilizado, diante de todas as suas vantagens (STOICA e STAN, 2021).

Figura 16: Fuso de esferas com castanha em corte mostrando as esferas.



Fonte: (INDUSTRIAIS, 2023).

#### **2.3.4 Motor de Passo**

Um motor de passo é um tipo de motor elétrico que converte pulsos elétricos discretos em movimentos mecânicos incrementais. Eles se diferenciam dos outros tipos de motores pelo fato de serem projetados para girar em passos precisos e previsíveis, onde cada pulso elétrico resulta em um ângulo específico de rotação do motor diferentemente do que ocorre em um motor CC comum ou de um motor de indução, que giram continuamente (CONSTANDINOU, 2005).

É chamado de passo o menor deslocamento angular para qual o motor foi projetado para realizar, e pode ser calculado, pelo quociente de uma revolução

completa pela quantidade de passos necessária para que o eixo do motor realize essa revolução, ou seja:

$$Passo = \frac{360^\circ}{Passos/Revolução} \quad (2.1)$$

Por exemplo, um motor que foi projetado para completar uma revolução (360°) quando recebe 200 passos, tem um passo de 1.8°.

Os motores de passo podem rotacionar seu eixo nos dois sentidos, são capazes de manter uma posição angular específica e além disso, conseguem entregar o torque nominal mesmo em baixas rotações, o que contribui ainda mais para a precisão do movimento. Isso torna os motores de passo adequados para aplicações que exigem controle de posicionamento preciso, como em impressoras 3D, máquinas CNC, equipamentos de automação industrial, robótica e muitos outros dispositivos que envolvem movimentação controlada. (CONSTANDINO, 2005).

Quanto ao tamanho, estes motores normalmente são fabricados seguindo a padronização do *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), onde os valores numéricos fazem menção à largura do motor em polegadas. Os tamanhos de motores de passo mais comumente utilizados em máquinas CNC são os NEMA 17, 23, 34 e 42 (CONSTANDINO, 2005). A Figura 17 mostra um motor de passo enquanto que a Figura 18 mostra os esquemas de ligação das bobinas de motores de passo com diferentes quantidades de terminais.

Figura 17: Motor de passo padrão NEMA 34 de 35 Kgf.cm.



Fonte: (TECMAF, 2023).

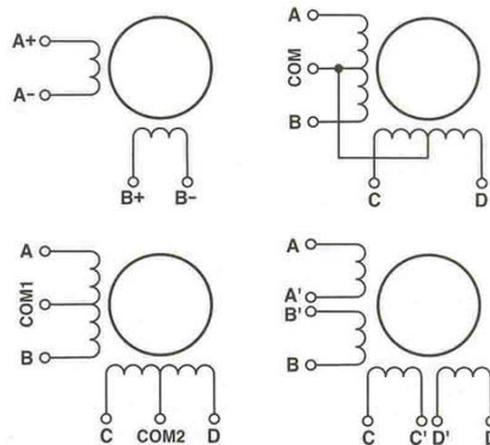
Entende-se por fases, a quantidade de enrolamentos que produzem um fluxo magnético distinto. Os motores de passo normalmente possuem duas fases, mas também existem motores de passo com 3 e 5 fases (CONSTANDINOU, 2005).

Quanto à sua construção, existem 3 tipos de motores de passo: os de ímã permanente, de relutância variável e híbridos. Os motores de ímã permanente utilizam um rotor sem dentes com um ímã permanentemente magnetizado e bobinas eletromagnéticas no estator, fazendo o rotor girar conforme a comutação das bobinas. Em contraste, os motores de relutância variável possuem um rotor de material ferromagnético com múltiplos dentes, e um estator bobinado, resultando em rotação conforme os dentes se alinham com as bobinas ativadas. Motores híbridos combinam as melhores características dos dois tipos anteriores, possuindo um rotor dentado com ímã permanentemente magnetizado axialmente, permitindo rotação ao alinhar os dentes próximos às bobinas ativadas (BRITES e SANTOS, 2008).

Quanto à sua forma de operação, eles podem ser do tipo Unipolar ou Bipolar. Os motores de passo Unipolares possuem 2 enrolamentos por fase, um para atender cada sentido de corrente. Desta forma, por meio de uma derivação central na junção dos enrolamentos, é possível inverter o polo magnético sem alterar o sentido da corrente nas bobinas, fazendo apenas a comutação entre os terminais. Já os motores Bipolares possuem um único enrolamento por fase, de forma que é necessária a inversão do sentido da corrente para ser inverter o polo magnético (BRITES e SANTOS, 2008).

Se tratando apenas dos motores de passo bifásicos, estes podem possuir 4, 5, 6 ou 8 terminais (ou simplesmente fios) como mostra a Figura 18, e a forma como estes são ligados definem se a operação será da forma Bipolar ou Unipolar. Os motores de passo com 4 fios configuram a ligação Bipolar, enquanto que os com 5 fios configuram a ligação Unipolar. Os motores com 6 fios podem ser utilizados na configuração Unipolar ou Bipolar série. Já os motores com 8 fios podem ser utilizados na configuração Unipolar, Bipolar série ou Bipolar paralela (CONSTANDINOU, 2005).

Figura 18: Esquemas de ligação de motor de passo com 4, 5, 6 e 8 fios.



Fonte: (CONSTANDINO, 2005).

### 2.3.5 Spindle

Um motor *Spindle* é um tipo de motor utilizado em várias aplicações industriais, especialmente em máquinas-ferramenta, como fresadoras CNC, tornos e retificadoras. Ele desempenha um papel crucial no funcionamento dessas máquinas, pois é responsável por fornecer a energia necessária para girar a ferramenta de corte ou retificação em alta velocidade (MAEDA, CAO e ALTINTAS, 2005).

Os *spindles* são projetados para oferecer alta potência e precisão, operando com baixo ruído e vibração. Eles são caracterizados por sua capacidade de atingir altas rotações por minuto (RPM) (acima dos 18000 RPM), permitindo que as máquinas realizem trabalhos de usinagem com eficiência e precisão. Eles também podem incluir recursos como sensores de temperatura e monitoramento de vibração para garantir um desempenho seguro e confiável. Além disso, podem ser refrigerados a ar ou a líquido, dependendo dos requisitos de resfriamento e potência (MAEDA, CAO e ALTINTAS, 2005).

Quanto à sua alimentação, eles podem ser de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). *Spindles* CA normalmente utilizam tensão trifásica, portando necessitam de um inversor de frequência para fornecer esta alimentação. Por meio do inversor de frequência é possível controlar a velocidade de rotação do *spindle*, por meio do ajuste da frequência da tensão de alimentação. Já os *spindles* CC, como o da Figura 19, têm a sua velocidade determinada pela modulação da tensão de

alimentação recebida, logo é possível fazer o controle da sua velocidade por meio de *drivers* e reguladores de tensão. Para ambos os casos, é possível utilizar a técnica de *Pulse Width Modulation (PWM)*, explicada com mais detalhes adiante, para fazer com que o microcontrolador controle a velocidade de rotação da ferramenta, de acordo com as necessidades específicas da operação (MAEDA, CAO e ALTINTAS, 2005).

Figura 19: Motor *Spindle* de corrente contínua.



Fonte: (DHGATE, 2023).

## 2.4 Eletrônica

A eletrônica de uma máquina CNC é composta de circuitos eletrônicos que sejam capazes de acionar os motores de passo, sensores, controladores, podendo haver também telas, botoeiras e outros dispositivos eletrônicos e eletromecânicos.

### 2.4.1 Microcontroladores

Se tratando de eletrônica digital, há 3 conceitos que muitas vezes são confundidos e tratados erroneamente como sinônimos: microprocessador, microcomputador e microcontrolador.

Um microprocessador é um dispositivo que abriga em um único chip dois blocos funcionais: a Unidade de Controle (UC) e a Unidade de Processamento Central (CPU,

do inglês *Central Processing Unit*). Estes dispositivos necessitam de componentes adicionais para operarem adequadamente (MEDEIROS, 2014).

Um microcomputador, por sua vez, é um sistema que possui dispositivos externos operando em conjunto com um microprocessador. Os outros dispositivos que comumente compõem um microcomputador são:

- Memória de Programa, onde o código é armazenado;
- Memória de Dados, onde os valores são armazenados temporariamente;
- Periféricos de entrada e saída, que fazem a interface do microcomputador com o meio externo, tais como:
  - Entradas e saídas de propósito geral (GPIOs);
  - Temporizadores e Contadores;
  - Conversores Analógico-Digitais (ADC);
  - Conversores Digital-Analógicos (DAC);
  - Unidades de Interface de Rede;
- E em alguns casos, Osciladores internos, que fornecem um relógio de sincronização (MEDEIROS, 2014);

Já um microcontrolador é um dispositivo que incorpora em um único *chip* todos os componentes de um microcomputador, (microprocessador, memória, periféricos de entrada/saída e outros componentes). Por isso, em linhas gerais pode-se dizer que se trata de um microcomputador em um único *chip* (SoC, do inglês *System-on-a-chip*) (PENIDO e TRINDADE, 2013).

Por serem um SoC, normalmente eles são projetados para executar tarefas específicas, entretanto, cada vez mais vem se observando o seu uso em dispositivos multifuncionais, como por exemplo os celulares. Eles são amplamente utilizados em uma variedade de dispositivos eletrônicos, desde eletrodomésticos e automóveis até dispositivos médicos e industriais. Além disso, os microcontroladores são escolhas populares para projetos de estudantes e entusiastas da eletrônica, devido à sua facilidade de uso, ampla disponibilidade no mercado e um custo relativamente baixo quando comparado com outros dispositivos, como por exemplo o computador

*desktop*. Eles permitem que os criadores implementem rapidamente suas ideias, desde projetos simples até projetos mais complexos (PENIDO e TRINDADE, 2013).

Os microcontroladores podem ser adquiridos de forma isolada ou embarcados em placas de desenvolvimento, que possuem outros componentes já integrados com o microcontrolador, para simplificar o seu uso e implementação em projetos. As plataformas de desenvolvimento mais populares em projetos de robótica e automação de baixo custo são as consolidadas placas da família Arduino, e com uma rápida difusão nos últimos anos, os módulos da família ESP32 e ESP8266.

#### 2.4.1.1 Arduino

Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source*, projetada para facilitar o desenvolvimento de projetos e dispositivos eletrônicos. A placa Arduino é equipada com um microcontrolador, geralmente baseado em tecnologia AVR, que atua como o cérebro do sistema, e possui uma série de pinos de entrada/saída (I/O) que permitem conectar sensores, atuadores e outros componentes eletrônicos de maneira simples. As placas Arduino mais populares são o Arduino Uno, mostrada na Figura 20, Arduino Nano, Arduino Mega 2560, Arduino Leonardo e Arduino Due (ARDUINO, 2018).

Figura 20: Arduino Uno Rev3 com módulo ATMEGA328p embarcado.

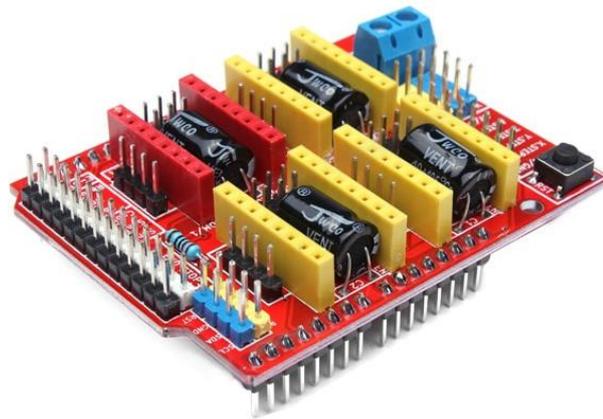


Fonte: (ARDUINO, 2023).

É possível utilizar uma placa Arduino como plataforma de controle de uma máquina CNC, por meio de uma PCB projetada para alojar em uma única placa os componentes eletrônicos necessários para controlar uma máquina CNC. Essas PCBs são conhecidas como CNC *Shields* (do inglês, escudo), que se encaixam com facilidade na placa de desenvolvimento do Arduino e simplifica a utilização dos seus terminais para fazer o controle de uma máquina CNC.

A *shield* mais popular é a CNC *Shield* V3, mostrada na Figura 21, que foi concebida para operar com o Arduino Uno. Esta placa possui soquetes para abrigar 4 drivers, diversos pinos para facilitar a ligação dos componentes por meio de jumpers além de possuir um conector para entrada de alimentação externa para os motores de passo (HASAN, SHAKIR e NAJI, 2018).

Figura 21: CNC Shield V3 para Arduino.



Fonte: (MAKERHERO, 2023).

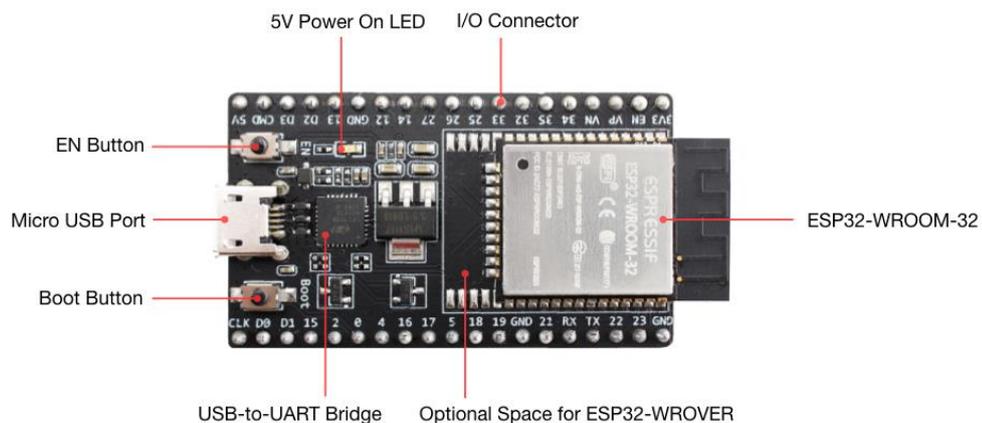
#### 2.4.1.2 ESP32

ESP32 é uma série de microcontroladores de baixo custo e baixo consumo de energia, projetado pela empresa chinesa Espressif Systems. Eles são baseados em um processador Tensilica Xtensa LX6, que pode ser executado a velocidades de até 240 MHz, e possuem memória RAM e memória *flash* incorporados, usadas para armazenar o programa e os dados. São amplamente utilizados em projetos de Internet das Coisas (IoT), pois oferecem conectividade Wi-Fi e Bluetooth integradas, além de possuir uma ampla variedade de interfaces como UART, SPI, I2C, ADC, DAC e GPIO,

que permitem a comunicação com outros dispositivos e sensores. Juntamente com uma variedade de recursos e periféricos (ESPRESSIF, 2023).

A Espressif disponibiliza os ESP32 tanto em SoCs, quanto em módulos e em placas de desenvolvimento. As placas de desenvolvimento mais populares são a ESP32 DevKitC, mostrada na Figura 22, e o NodeMCU-32S, valendo mencionar também o Wemos D1 Mini ESP32, Adafruit HUZZAH32 e SparkFun ESP32 Thing.

Figura 22: ESP32-DevKitC V4 com módulo ESP32-WROOM-32 soldado.



Fonte: (ESPRESSIF, 2023).

A Tabela 1 abaixo apresenta uma comparação entre os principais aspectos das principais placas de desenvolvimento das famílias Arduino e ESP32.

Tabela 1: Comparativo entre Arduino UNO e ESP32 DevKit C.

	<b>Arduino UNO</b>	<b>ESP32 DevKit C</b>
<b>Processador</b>	ATmega328P de 8 bits	Xtensa LX6 de 32 bits
<b>Memória SRAM</b>	2 KB	520 KB
<b>Armazenamento flash</b>	32 KB	4 MB
<b>Tensão de nível lógico</b>	0-5 V	0-3.3 V
<b>Wi-Fi integrado</b>	Não	Sim
<b>Bluetooth integrado</b>	Não	Sim
<b>Tamanho aproximado</b>	68,58 x 53,34mm	27,5 x 51,0 mm

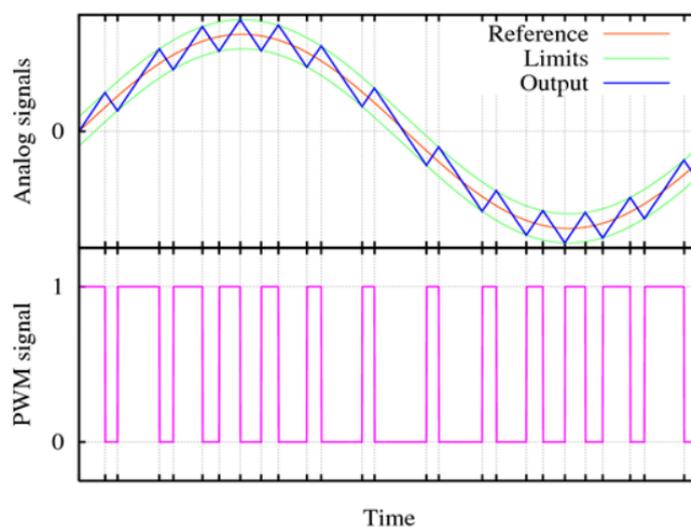
Fonte: (DUTRA, 2023).

### 2.4.2 PWM

PWM é a sigla em inglês para Modulação por Largura de Pulso, que diz respeito a uma técnica utilizada em dispositivos eletrônicos para produzir um sinal analógico a partir de um sinal digital. O PWM consiste em fazer o chaveamento em alta frequência de um sinal digital, controlando a proporção do tempo em que este sinal está em nível lógico alto (ligado) e em nível lógico baixo (desligado), onde a razão entre o tempo em nível alto e o período total é chamada de ciclo de trabalho (*duty cycle*). Fazendo isso, é possível controlar a potência média entregue durante um intervalo de tempo, de forma que o resultado ao longo do tempo se aproxima de um sinal analógico. A Figura 23 mostra um exemplo da utilização desta técnica, onde através da variação do *duty cycle*, obtido um sinal que se aproxima de um sinal analógico (SILVEIRA, 2016).

Esta técnica é muito empregada em circuitos eletrônicos e dispositivos de controle, como por exemplo microcontroladores, pois permite a transmissão de um sinal analógica a partir de sinais digitais (valores discretos). Com o PWM, é possível controlar a velocidade de motores, a intensidade luminosa de LEDs, a potência de um aquecedor ou refrigerador, a potência de um LASER, entre muitas outras aplicações, a partir de um microcontrolador (SILVEIRA, 2016).

Figura 23: Exemplo geração de um sinal analógico utilizando a técnica de PWM.



Fonte: (SILVEIRA, 2016).

### 2.4.3 Drivers para Motores de Passo

Um *Driver* para motor de passo é um dispositivo eletrônico utilizado para acionar motores de passo, fazendo a interface entre os sinais de controle advindos do microcontrolador e os pulsos que são enviados às bobinas do motor. Os drivers simplificam muito o controle do motor de passo, visto que, a maioria destes dispositivos necessita apenas de um *bit* para determinar o sentido de rotação, e um trem de pulsos para determinar a amplitude e a velocidade do giro (SMID, 2003).

Os drivers utilizados em máquinas CNC normalmente trabalham com micropassos, que é uma configuração que altera a forma como o *driver* converte os sinais recebidos do controlador em pulsos para o motor de passo. Exemplificando, um motor de passo comum com resolução de  $1.8^\circ$ , precisa de 200 pulsos para dar uma volta completa ( $360^\circ$ ). Ao utilizar um *driver* com uma configuração de  $\frac{1}{2}$  passo, os mesmos 200 pulsos provocam no eixo do motor uma rotação de  $180^\circ$ . Isso significa que cada pulso emitido pelo controlador só provoca um deslocamento angular de  $0.9^\circ$  no eixo do motor, aumentando em duas vezes a resolução do motor. Desta forma, esta técnica de micropassos permite fazer um controle mais preciso do giro do motor, uma vez que dilata a escala de possibilidades de posicionamento angular do mesmo. Existem *drivers* encontrados facilmente no mercado que conseguem alcançar resoluções de até  $\frac{1}{32}$  micropassos, permitindo um controle extremamente preciso do motor de passo. Esta técnica tem como desvantagem a redução da velocidade de rotação eixo do motor à medida que a resolução aumenta muito, portanto, uma máquina precisa e eficaz deve trabalhar com uma configuração de micropassos que equilibre resolução e velocidade (OLIVEIRA, 2022).

A maioria dos *drivers* comercializados são projetados para acionar motores na configuração bipolar com 4 fios. Um *driver* deste tipo, normalmente possui como entradas:

$V_{MOT}$  e  $GND$ : Tensão de alimentação para os motores de passo;

$V_{DD}$  e  $GND$ : Tensão de alimentação do circuito de controle;

**STEP** (ou **PUL**): Sinal de controle que determina a quantidade de passos através da quantidade de pulsos recebidos do microcontrolador;

**DIR:** Sinal de controle que determina o sentido de rotação do motor de passo;

**ENA:** Sinal de controle que habilita o funcionamento do *driver*;

E como saídas, os 4 terminais das bobinas dos motores: **1A, 1B, 2A e 2B**.

Além disso, os estes *drivers* normalmente possuem um mecanismo de controle da corrente máxima que ele deve limitar e um mecanismo de configuração dos micropassos que ele irá operar.

Estes *drivers* normalmente se diferenciam pela corrente (que reflete a potência) que podem fornecer para os motores de passo, o que implica diretamente no seu tamanho, construção e artifícios de resfriamento.

Os *drivers* de baixa potência mais comuns do mercado são o A4988 e o DRV8825, *drivers* pequenos, de boa eficiência (conseguem realizar um controle eficaz do motor gastando menos energia que *drivers* maiores), de ampla disponibilidade no mercado (tanto nacional quanto internacional) e com preço acessível para a maioria dos projetistas. Eles possuem o mesmo *pinout*, logo, podem ser facilmente substituídos um pelo outro, utilizam 3 pinos para fazer a seleção dos micropassos, além de ambos possuírem um *trimpot* para ajuste da corrente máxima a ser limitadas por eles (CACPNRJ, 2022). Estes *drivers* são utilizados para controlar motores menores, normalmente até NEMA 23, a depender da corrente do motor. As principais diferenças entre estes *drivers* estão listadas na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2: Principais diferenças entre os *drivers* A4988 e DRV8825.

	<b>A4988</b>	<b>DRV8825</b>
<b>Tensão Lógica</b>	3 – 5.5 V	2.5 – 5.25 V
<b>Tensão dos Motores</b>	8 – 35 V	8.2 – 45 V
<b>Corrente Máxima</b>	2 A	2.5 A
<b>Resolução máxima</b>	1/16	1/32

Fonte: (CACPNRJ, 2022).

No entanto, os *drivers* projetados para controlar motores maiores (como por exemplo, NEMA 23, 34 e 42) com correntes de intensidade superiores a 2 A, normalmente possuem uma construção mais robusta. Estes são maiores que os

citados anteriormente, têm sua PCI protegida por uma tampa e possuem um dissipador acoplado em sua estrutura para beneficiar o resfriamento durante a operação. Seus terminais são acessados através de bornes, que podem ser facilmente desconectados em conjunto e utilizam parafusos de aperto para assegurar a fixação adequada dos fios. Drivers deste tipo normalmente possuem um conjunto de pequenas chaves seletoras, que servem para fazer a configuração de micropassos, limite de corrente e, em alguns casos, da redução de corrente quando o motor está parado. A Figura 24 mostra um exemplo deste tipo de driver, o TB6600, muito comercializado no mercado brasileiro atualmente.

Figura 24: Driver de Micropassos TB6600.



Fonte: (SMARTKITS, 2023).

#### 2.4.4 Chaves Fim de curso

Chave fim de curso é o nome comumente dado à dispositivos utilizados para detectar a posição de um objeto ou componente móvel em uma máquina. Elas são frequentemente empregadas para indicar quando um movimento alcançou um ponto específico, seja para ativar ou desativar um processo, ou para evitar que um objeto ultrapasse determinados limites, evitando assim que esta quebre, se desmonte e/ou cause algum acidente (SILVA, GALDINO e FERNANDES, 2016).

Quando um circuito está interrompido quando uma chave está em sua condição normal de funcionamento, e o acionamento da mesma provoca o fechamento de tal

circuito, diz que essa chave é do tipo Normalmente Aberta. Já quando a chave está em sua condição normal e o circuito encontra-se fechado, e o acionamento desta chave provoca interrupção do circuito, diz-se que esta chave é do tipo Normalmente Fechada (SILVA, GALDINO e FERNANDES, 2016).

O tipo de fins de curso mais simples são as chaves *Micro Switch*, mostrada na Figura 25, que são basicamente interruptores que possuem um atuador mecânico que quando acionado através de contato físico, fecha ou interrompe um circuito elétrico. Devido a sua simplicidade, estas chaves possuem um valor aquisitivo inferior ao de sensores eletrônicos, e por isso são mais utilizadas em sistemas de baixo custo.

Figura 25: Chave fim de curso Micro Switch.



Fonte: (ROBÓTICA, 2023).

## 2.5 Software/Firmware

### 2.5.1 G-Code

Para controlar de fato os movimentos da máquina CNC, o microcontrolador precisa saber quais sinais enviar para os drivers para que o trabalho ocorra como desejado. É necessário portanto uma linguagem que traduza os movimentos da máquina em instruções de comando para o microcontrolador.

O *G-Code*, (ou Código G, em português) é uma linguagem de programação utilizada para controlar máquinas CNC, máquinas automatizadas utilizadas em processos de fabricação, como usinagem, corte a laser, impressão 3D e muito mais. O termo "*G-Code*" refere-se ao conjunto de comandos que instruem a máquina CNC a realizar determinadas operações (CHAMPLAIN e WOODCOCK, 2015).

O *G-Code* é composto por uma série de linhas de texto que contêm comandos específicos, cada um identificado por uma letra. Essas letras são seguidas por um número, que representa um parâmetro ou valor associado ao comando. Os comandos *G-Code* podem incluir operações como movimento de eixos, controle de velocidade, acionamento de ferramentas, configuração de coordenadas e muito mais (CHAMPLAIN e WOODCOCK, 2015).

### **2.5.2 GRBL**

O GRBL é um *firmware* de código aberto projetado para controlar máquinas CNC. Ele foi originalmente desenvolvido por Simen Svale Skogsrud em 2009 (inspirado no *Arduino G-Code Interpreter* de Mike Ellery) para controlar uma pequena máquina de plotagem. Desde 2011, o GRBL está avançando como um projeto de código aberto dirigido pela comunidade sob a liderança pragmática de Sungeun K. Jeon Ph.D (GNEA/GRBL, 2023).

O GRBL é escrito em linguagem C e é projetado para ser executado em placas Arduino, especificamente nas placas baseadas no ATmega328P e ATmega2560, logo, ele pode ser carregado em uma placa Arduino usando o *software* de programação Arduino IDE. Depois de instalado, é possível ajustar as configurações do *firmware* para se adequarem às especificações da máquina. Ele é projetado para ser compacto e eficiente, permitindo um controle preciso dos motores da máquina CNC com base em comandos *G-Code* (SARGUROH e RANE, 2018).

O GRBL suporta uma ampla gama de recursos, incluindo movimento linear e rotativo, controle de velocidade, avanço e recuo, ajuste automático de aceleração e desaceleração, homing (posicionamento inicial), entre outros recursos essenciais para operações CNC. Além disso, o *firmware* oferece uma interface serial para comunicação com um computador host, permitindo o envio de comandos *G-Code* para controlar a máquina (SARGUROH e RANE, 2018).

Como é um *firmware* de código aberto, o GRBL foi adaptado para uso em centenas de projetos, como máquinas de fresamento e roteamento, impressoras 3D, cortadores a laser, escritores manuais automáticos, perfuradores, pintores de grafite

e máquinas de desenho. Essa versatilidade faz do GRBL um dos firmwares mais populares e amplamente utilizados em máquinas CNC de pequeno porte (GNEA/GRBL, 2023).

Mesmo sendo originalmente desenvolvido para o Arduino, novas versões foram desenvolvidas para atuar em outras plataformas de controle, como é o caso do Grbl\_Esp32, uma versão adaptada para ser utilizada em placas de desenvolvimento da família ESP32 (BDRING/GRBL, 2023).

### **2.5.3 G-Code Sender**

Para enviar comandos ou um arquivo *G-Code* para a máquina e manter uma interface de supervisão do trabalho que está sendo executado, é necessário fazer o uso de algum *software* do tipo “*G-Code Sender*”, que permitem que o usuário faça essa comunicação com a máquina, além de fazer uma série de parametrizações da operação a ser feita, tais como especificações da ferramenta, instruções de segurança e limitações de velocidade, precisão, entre outras (GNEA/GRBL, 2023).

Apesar de existirem unidades de controle que trabalhem com armazenamento embarcado (como por exemplo cartões SD), o que permite que elas leiam o *G-Code* sem a necessidade de estar conectada a um computador por meio de um *G-Code Sender*, o uso desses softwares é recomendado inclusive por questões de segurança, pois eles contêm interfaces e comandos que permitem um controle em tempo real da máquina, possibilitando o usuário pausar e retomar um trabalho, ou abortá-lo no meio da execução caso algo não ocorra como esperado.

Existem softwares especializados para tipos específicos de máquinas CNC, como impressoras 3D e Gravadoras *LASER*. Os principais softwares utilizados para controlar fresadoras CNC são: *Universal G-Code Sender*, *Candle*, *CNCJS*, *Easel*, *GrblPanel*, *bCNC*, entre outros, gratuitos em sua maioria (GNEA/GRBL, 2023).

#### 2.5.4 Modelagem das Placas

Por mais que seja possível controlar a máquina através de comandos *G-Code* individualmente, confeccionar qualquer objeto enviando os comandos de controle da ferramenta e movimentação da máquina um a um não seria nada viável.

Para isso, existem vários *softwares* de Desenho Auxiliado por Computador (em inglês *Computer-Aided Design*, CAD) e Manufatura Auxiliada por Computador (em inglês, *Computer-Aided Manufacturing*, CAM), cujo objetivo é a modelagem computacional do objeto de interesse. A partir deste modelo, é possível gerar o arquivo *G-Code* que corresponde à confecção do objeto criado, levando em consideração todas as especificações da máquina CNC: *firmware* interpretador do *G-Code*, passos por milímetros, especificações da ferramenta de trabalho, entre outras (SILVA, 2018).

Se tratando da confecção de PCBs, o processo de criação do *G-Code* se dá em duas etapas: primeiro, utiliza-se um *software* de Automação de Desenho Eletrônico (*Electronic Design Automation*, EDA) para elaborar o projeto eletrônico da placa, com todos os componentes devidamente organizados e com suas trilhas de interconexão distribuídas pela placa, e então é gerado um arquivo *Gerber*. Um arquivo *Gerber* é um formato de arquivo padrão para transferência de dados de projetos de PCBs, muito utilizado na indústria de fabricação de placas e em processos relacionados à fabricação eletrônica, que contém informações detalhadas sobre as camadas de uma PCB, incluindo a disposição dos componentes, as trilhas de cobre, as áreas de solda, as máscaras de solda e outros elementos relevantes. (LI, 2020).

Os *softwares* EDA mais utilizados para projetar PCBs são:

- Proteus;
- EAGLE;
- KiCad; (WANG, 2021)

A segunda etapa consiste em utilizar um outro *software* para criar os percursos geométricos contidos no arquivo *Gerber* (ilhas, trilhas, furos e eventuais elementos de texto presentes no projeto da PCB), e a partir disso criar um arquivo *G-Code*. Existem alguns *softwares* capazes de fazer esta conversão, sendo FlatCAM um exemplo bastante difundido e utilizado pelos projetistas de protótipos PCBs (FLATCAM, 2023).

### 3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A primeira etapa neste projeto consiste em identificar as falhas no projeto original da fresadora que fizeram com que ela viesse a apresentar defeitos e ficar inoperante com pouco tempo de uso. A partir disso, orientando-se pela pesquisa científica que foi feita a respeito do tema, será escolhido os melhores componentes encontrados no mercado nacional, que permitam fazer modificações e melhorias que tornarão a fresadora apta novamente apta a realizar a confecção de PCBs. Por fim, espera-se a partir de testes com a fresadora em operação, validar os resultados para enfim concluir se a mesma é capaz de confeccionar tais placas com precisão satisfatória. A Figura 26 mostra a máquina deste trabalho, em sua versão original de fábrica.

Figura 26: Máquina CNC deste trabalho em sua versão original.



Fonte: (LPKF, 2011).

Vale salientar que antes do início deste trabalho, outras tentativas de reabilitação desta fresadora foram iniciadas, como a modificação do eixo Z e a substituição do *spindle*, porém, não obtiveram sucesso. Portanto, no início deste trabalho, a máquina em questão já havia sofrido pequenas modificações, a destacar a tentativa de adaptação de um novo *spindle*, que pode ser visto na Figura 27, e com mais detalhe adiante na Figura 30.

Figura 27: Fresadora deste trabalho aquando do início do projeto.



Fonte: (AUTOR, 2023).

### 3.1 Delimitação do trabalho

O projeto original desta fresadora é bastante sofisticado para a época a qual foi projetada (por volta do ano de 2011), possuindo alguns itens que não são tão comuns na maioria das máquinas encontradas no mercado: originalmente, ela trabalhava em conjunto com um aspirador, cujo tubo de sucção se acoplava à mesa de trabalho distribuindo-se em seu interior e criando um vácuo sob uma tela cerâmica semi-porosa, de forma que o vácuo criado prendia firmemente a placa a ser confeccionada na mesa de trabalho; além disso, ela possuía um mecanismo que permitia a troca automática da ferramenta de trabalho, mecanismo este que veio a ser o principal motivo da quebra prematura da fresadora.

Diante disto, delimitou-se para este projeto as modificações necessárias na fresadora para torná-la apta a realizar sua função primordial que é a confecção de PCBs, através da movimentação coordenada do *spindle* ao longo dos 3 eixos. Sendo assim, o desenvolvimento deste trabalho não visa contemplar o sistema de troca automática de ferramentas e nem o sistema pneumático de sucção.

## 3.2 Estrutura Mecânica

A estrutura mecânica da fresadora em questão é bastante robusta e atende bem as necessidades para a confecção de PCBs. A máquina é uma CNC do tipo cartesiana, com uma mesa móvel na direção do eixo Y, tendo seu eixo X estando sustentado por um pórtico fixo.

### 3.2.1 Eixos X e Y

Os eixos X e Y são similares e apresentam um controle total da movimentação do cabeçote no plano horizontal (plano XY). Ambos utilizam fusos trapezoidais em conjunto com uma castanha de rosca dupla como meio de transmissão, e guias lineares com patins como sistema de guias, sendo 4 patins para fixar a mesa móvel de trabalho no eixo Y e apenas 2 patins no eixo X para sustentar o simples mecanismo de elevação vertical do *spindle* ao longo da placa principal do eixo X.

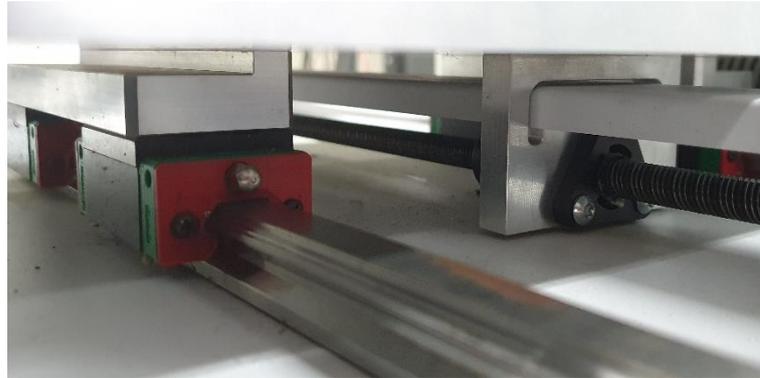
Sendo assim, optou-se por aproveitar a estrutura da máquina, preservando os mecanismos de transmissão e de guia dos eixos X e Y, mostrados nas Figuras 28 e 29, respectivamente, fazendo apenas uma limpeza e lubrificação dos mesmos para garantir o seu bom funcionamento.

Figura 28: Sistema de transmissão do eixo X.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Figura 29: Sistema de transmissão e guias do eixo Y.

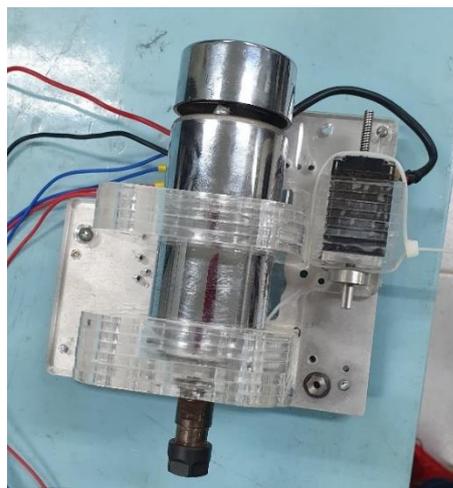


Fonte: (AUTOR, 2023).

### 3.2.2 Eixo Z

O projeto original desta fresadora não conta com um eixo Z completo, cuja altura do *spindle* pode ser controlada com precisão ao longo de todo o comprimento das guias. Ao invés disso, possui um sistema simples que mantém a ferramenta em contato com a peça a ser usinada por ação do peso da do próprio *spindle*, havendo um pequeno motor responsável por levantar totalmente a ferramenta para que esta se desloque sem ter contato com a placa a ser usinada. A Figura 30 mostra a placa principal do eixo Z aquando do início deste trabalho.

Figura 30: Placa principal do eixo Z aquando do início do projeto.

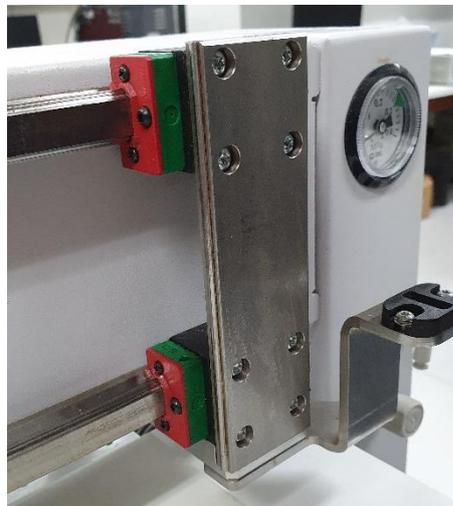


Fonte: (AUTOR, 2023).

Para aprimorar o desempenho e a capacidade de trabalho da máquina, optou-se por substituir este sistema de elevação do *spindle* por um eixo Z mais popular em fresadoras CNC, capaz de controlar através de um motor de passo a altura da ferramenta de trabalho, ao invés de apenas poder posicioná-la na mesa de trabalho por gravidade ou erguê-la completamente. Esta modificação expande completamente o leque de possibilidades de trabalhos a serem feitos pela máquina, uma vez que ao possuir controle da altura da fresa, é possível não só confeccionar PCBs, mas espera-se poder utilizá-la para realizar cortes e pequenas usinagens em materiais leves, como MDF e acrílico.

Para isto, é preciso levar em conta que o eixo Z precisa ser capaz de suportar o peso do *spindle* e fazer com que o cabeçote seja capaz de se mover verticalmente de forma suave e retilínea, e em passos pequenos. Além disso, este eixo deve mover-se completamente ao longo do eixo X, logo o suporte principal a ser projetado deve se encaixar perfeitamente tanto nos patins quanto no acoplamento da castanha do eixo X, encaixando-se no lugar da placa principal do eixo X, mostrada na Figura 31.

Figura 31: Placa principal do eixo X aquando do início do projeto.



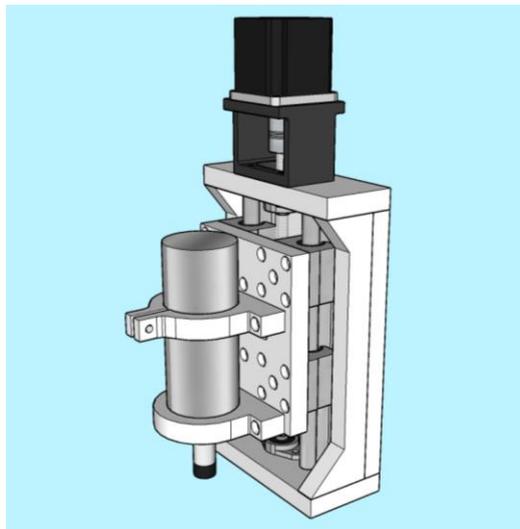
Fonte: (AUTOR, 2023).

Portanto, a escolha dos componentes deve garantir para o eixo robustez e precisão. Todo o projeto do novo eixo Z foi modelado no *SketchUp*, como mostra a Figura 32, para garantir que todas as peças fossem corretamente dimensionadas antes de serem adquiridas e confeccionadas.

Como sistema de guias, optou-se por utilizar um par de Eixos Lineares Retificados Suportados de 12mm em conjunto com 4 *Pillow Blocks* abertos, devido a sua capacidade de carga, resistência à deformação conferida pelo suporte dos eixos, e seu custo mais em conta que de guias lineares com patins.

Como sistema de tracionamento, optou-se por utilizar um Fuso Trapezoidal em conjunto com uma Castanha Anti-folga, ambos do modelo TR8 (8 mm de diâmetro) com um passo de 2 mm. As extremidades do fuso foram fixadas no suporte por meio de mancais do modelo KFL08, e, para prendê-lo à ponta do eixo do motor de passo utilizou-se um Acoplamento Flexível de alumínio 8 x 6.35 mm.

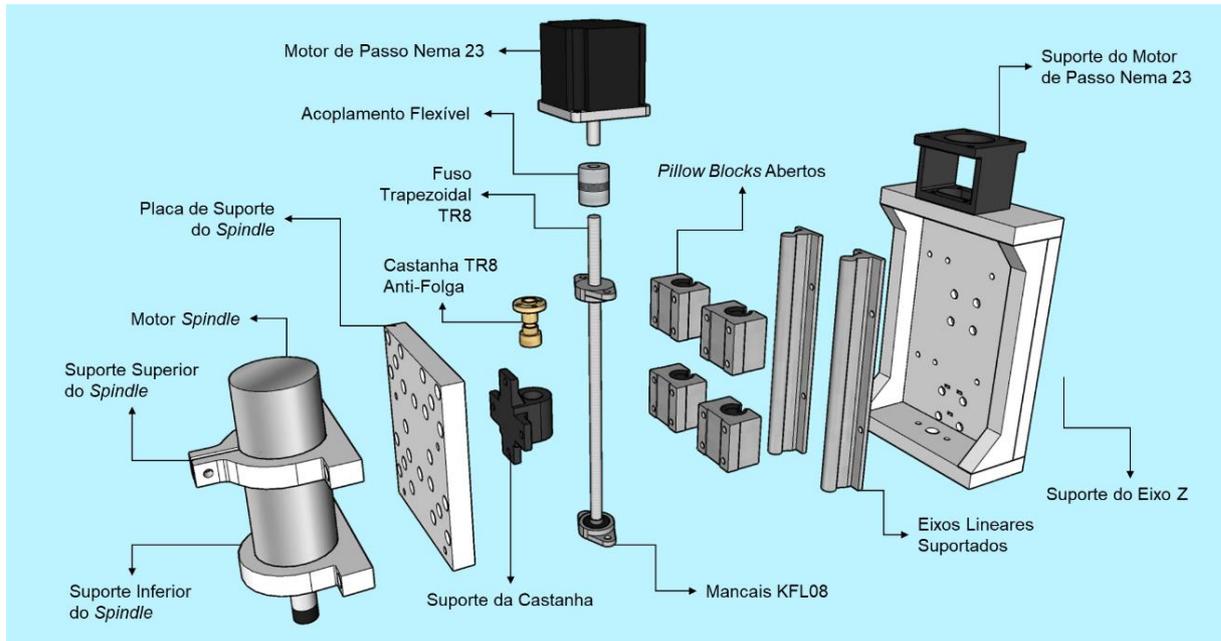
Figura 32: Projeto do novo Eixo Z feito no SketchUp.



Fonte: (AUTOR, 2023).

A Figura 33 mostra a vista expandida do novo eixo Z, mostrando com detalhe todos os componentes utilizados. Optou-se por confeccionar as peças mais planas usinando PEAD de 15 mm (ilustrados na cor branca), e as peças mais complexas através de impressão 3D utilizando PETG (ilustrados na cor preta), aproveitando os projetos feitos com extremo detalhe no *SketchUp* para gerar os arquivos *G-Code* (para a usinagem) e *STL* (para a impressão) das peças.

Figura 33: Vista expandida do novo Eixo Z.



Fonte: (AUTOR, 2023)

### 3.2.3 Motores de passo

O projeto original da fresadora conta com motores de passo trifásicos (possuem 3 conjuntos de bobinas defasadas em  $120^\circ$ ), padrão NEMA 23 de 0.9 N.m de torque (aproximadamente 9.2 Kgf.cm), mostrado na Figura 34. Estes motores são de boa qualidade, no entanto, os drivers encontrados no mercado nacional são, em sua quase totalidade, para motores de passo bifásicos com suas bobinas defasadas em  $90^\circ$ . Portanto, visando substituir o sistema eletrônico e de controle original da fabricante da fresadora, por um que utilize componentes comuns ao mercado nacional, optou-se por substituir os motores dos eixos X e Y.

Foram utilizados nos 3 eixos, motores de passo do modelo 23KM-C051-07V, mostrado na Figura 35. Estes motores também são do padrão NEMA 23, entregam um torque nominal de 12.6 kgf.cm e possuem um eixo com diâmetro de 1/4" (aproximadamente 6.35 mm), que se encaixa perfeitamente nos acoplamentos já existentes nos eixos X e Y da máquina. A Tabela 3 traz as informações técnicas deste motor, para 3 tipos de ligações de suas bobinas.

Figura 34: Motor de passo original da Fresadora.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Tabela 3: Dados para o motor de passo 23KM-C051-07V.

Ligação	Ângulo de Passo	Tensão	Corrente	Resistência por fase	Indutância por fase	Torque
Unipolar	1.8°	2.3 V	3.0 A	0.75 Ω	1.1 mH	9.0 kgf.cm
Bipolar Série	1.8°	3.15 V	2.1 A	1.5 Ω	4.4 mH	12.6 kgf.cm
Bipolar Paralela	1.8°	1.575 V	4.2 A	0.375 Ω	1.1 mH	12.6 kgf.cm

Fonte: (MINEBEA-MATSUSHITA, 2012).

Visando extrair do motor o maior torque possível, utilizando uma corrente menor, optou-se por ligar as suas bobinas na ligação Bipolar Série. Na instalação dos motores, escolheu-se manter os dissipadores de calor originais de máquina nos eixos X e Y, para garantir um melhor resfriamento dos motores e diminuir as chances de sobreaquecimento durante trabalhos muito demorados.

Figura 35: Motor de passo 23KM-C051-07V no eixo X com o dissipador de calor.



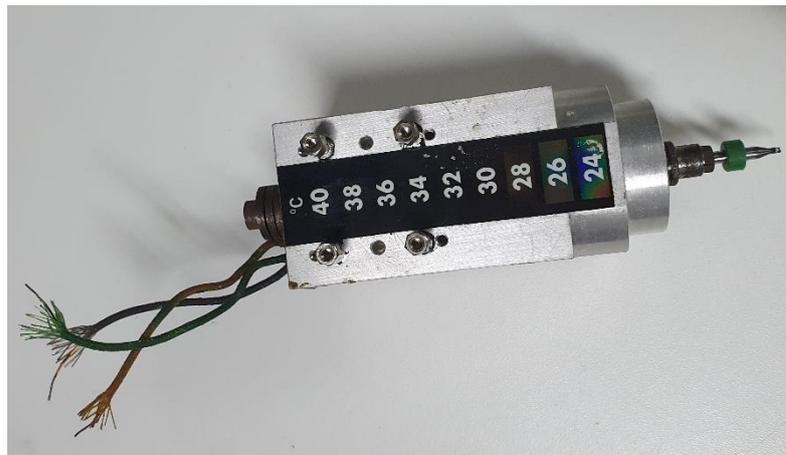
Fonte: (AUTOR, 2023).

### 3.2.4 Spindle

Como mencionado anteriormente, esta fresadora originalmente contava com um sistema de troca automática da ferramenta de trabalho, possuindo na parte traseira da mesa um magazine, onde diferentes fresas e brocas ficam depositadas. O *spindle* original da fresadora, mostrado pela Figura 36, possui um sistema de abertura e fechamento automático de seu mandril, que era capaz de soltar uma fresa no magazine e prender outra sem a necessidade de intervenção humana para isso.

Apesar de sofisticado, este sistema utilizava componentes frágeis, que com o tempo tenderiam a se desgastar e quebrar, deixando a máquina inoperante, como de fato aconteceu. Na Figura 27, o magazine original aparece solto sobre a mesa, uma vez que foi decidido não utilizar no projeto tal sistema de troca automática.

Figura 36: *Spindle* original da Fresadora.



Fonte: (AUTOR, 2023).

O *spindle* original foi substituído pelo mostrado na Figura 37, um *spindle* convencional de corrente contínua, de tensão nominal de 48 V e rotação de 18000 RPM. Para abrigar a fresa, foi acoplado no eixo do *spindle* um porta-pinças padrão ER11, munido de uma pinça de 6 mm.

Figura 37: *Spindle* CC utilizado como nova ferramenta de trabalho.

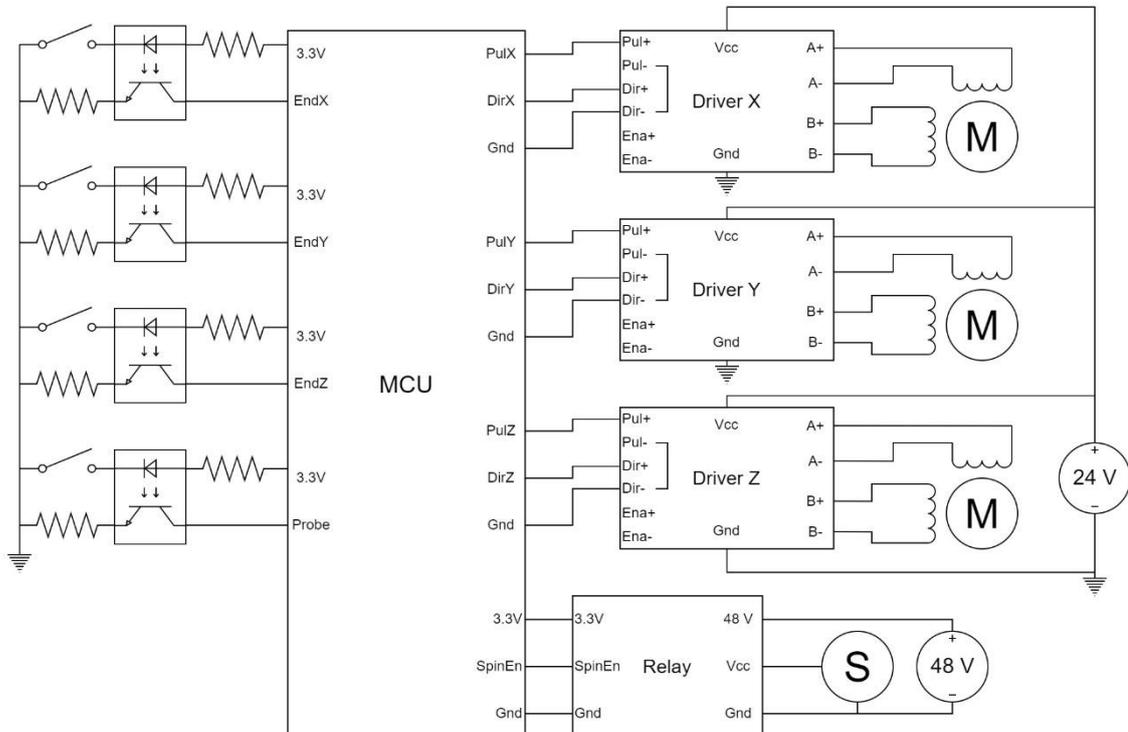


Fonte: (AUTOR, 2023).

### 3.3 Eletrônica

A Figura 38 mostra de forma simplificada as ligações elétricas entre dispositivos de controle e de potência feitas para a realização deste trabalho.

Figura 38: Esquema de ligações dos dispositivos elétricos neste trabalho.



Fonte: (AUTOR, 2023).

### 3.3.1 Alimentação elétrica

Para alimentar todos os sistemas de potência, foi aproveitada a fonte original da fresadora, uma fonte robusta com entrada padrão ligada à rede 220 V 60 Hz, e com saídas de 48 V e 24 V. A saída de 48 V foi utilizada para alimentar o *spindle*, com intermédio de um módulo relê, enquanto que a saída de 24 V foi utilizada para alimentar os 3 drivers dos motores de passo.

### 3.3.2 Drivers

Para controlar os motores de passo escolhidos, optou-se por utilizar *drivers* de média potência, por serem robustos e suportarem trabalhar bem, mesmo longe da sua capacidade máxima, além de possuírem dissipadores de calor diretamente acoplados em sua estrutura, dando mais segurança à eletrônica do projeto.

O *driver* escolhido foi o M5256, ilustrado na Figura 39, um *driver* de micropassos projetado para controlar motores com uma corrente de até 3.5 A, e com uma resolução de até 256 micropassos. Este *driver* pode ser alimentado com uma tensão contínua entre 9 e 40 V, logo, optou-se por utilizar uma das saídas da fonte com 24 V.

Figura 39: *Driver* de micropassos M5256.

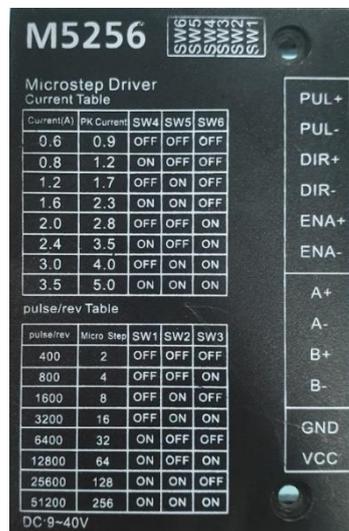


Fonte: (AUTOR, 2023).

Ele possui 6 chaves *microswitches* pra fazer as configurações do *driver*, sendo que as 3 primeiras definem os micropassos e as 3 últimas definem a corrente máxima que o *driver* limitará, como mostra a Figura 40, as informações da tampa do M5256.

Visando obter um equilíbrio entre torque e precisão, decidiu-se utilizar a configuração de 2 micropassos, de forma que são necessários 400 pulsos enviados pelo controlador para que o motor complete uma rotação. Optou-se por limitar a corrente dos motores no valor de 1.2 A eficaz (1.7 A de pico), valor que respeita a corrente máxima do motor, e suficiente para este operar bem e sem sobreaquecer.

Figura 40: Tampa do Driver M5256.

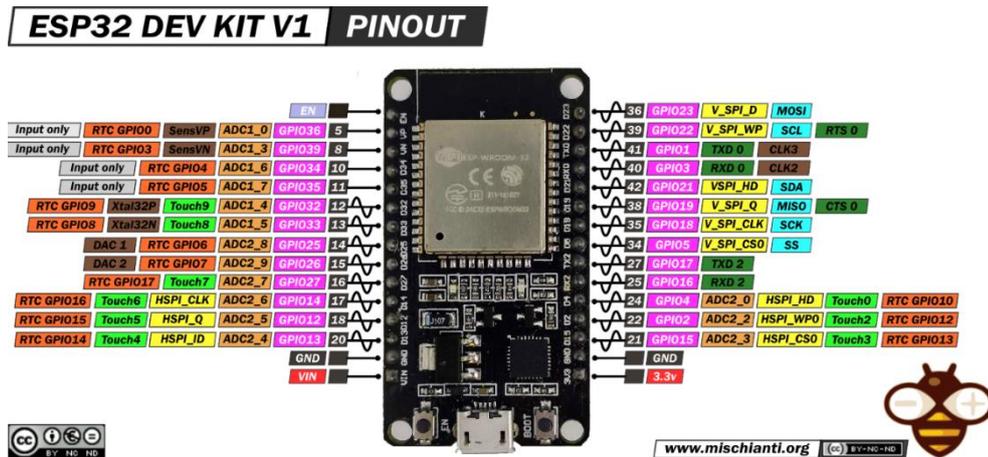


Fonte: (AUTOR, 2023)

### 3.3.3 Microcontrolador

Para este projeto, optou-se por utilizar como unidade central de controle o microcontrolador ESP32, a partir da placa de desenvolvimento ESP32 DevKitC V1, cujo *pinout* é mostrado na Figura 41. A escolha se deu pela ampla disponibilidade que esta placa tem no mercado, a um preço acessível e com a possibilidade de utilização do GRBL. Além disso, essa placa apresenta uma série de vantagens frente ao seu principal concorrente, o Arduino: maior memória e capacidade de processamento, Wi-Fi e Bluetooth integrado, tamanho reduzido (ESPRESSIF, 2023).

Figura 41: Pinout da placa ESP32 Dev Kit C V1.

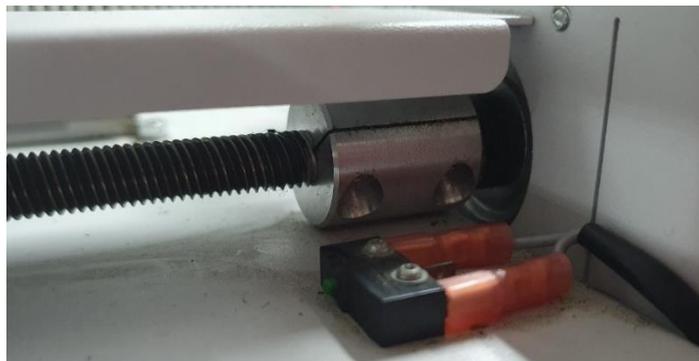


Fonte: (MISCHIANTI, 2023).

### 3.3.4 Fins-de-curso

Visando obter um sistema de controle mais seguro para a operação da máquina, optou-se por utilizar chaves *micro switches* de fim-de-curso em um dos limites de cada eixo, como mostra a Figura 42 com o fim-de-curso do eixo X. Desta forma, quando qualquer uma das chaves for acionada fechando o contato no *micro switch*, o sinal enviado ao microcontrolador informa ao GRBL que aquele eixo alcançou um de seus limites, e imediatamente o *software* para o funcionamento dos motores, evitando que estes forcem um movimento para além do limite do eixo e danifique a máquina. Estas chaves foram ligadas na configuração normal fechada, de forma que tanto o acionamento pela máquina quanto indesejáveis interrupções no circuito, como a ruptura de um dos fios, irá parar o movimento da máquina.

Figura 42: Chave fim-de-curso do eixo X.



Fonte: (AUTOR, 2023).

### **3.3.5 Filtragem de ruídos**

Como recurso de proteção contra acionamentos acidentais por parte de ruídos e/ou interferências eletromagnéticas, optou-se por utilizar optoacopladores na ligação das chaves fim de curso e da sonda de autonivelamento. Com o uso destes dispositivos, o circuito destas chaves fica eletricamente isolado das entradas do microcontrolador, uma vez que a transmissão da informação no fotoacoplador é feita internamente através da luz emitida por um LED e captada por um foto-transistor.

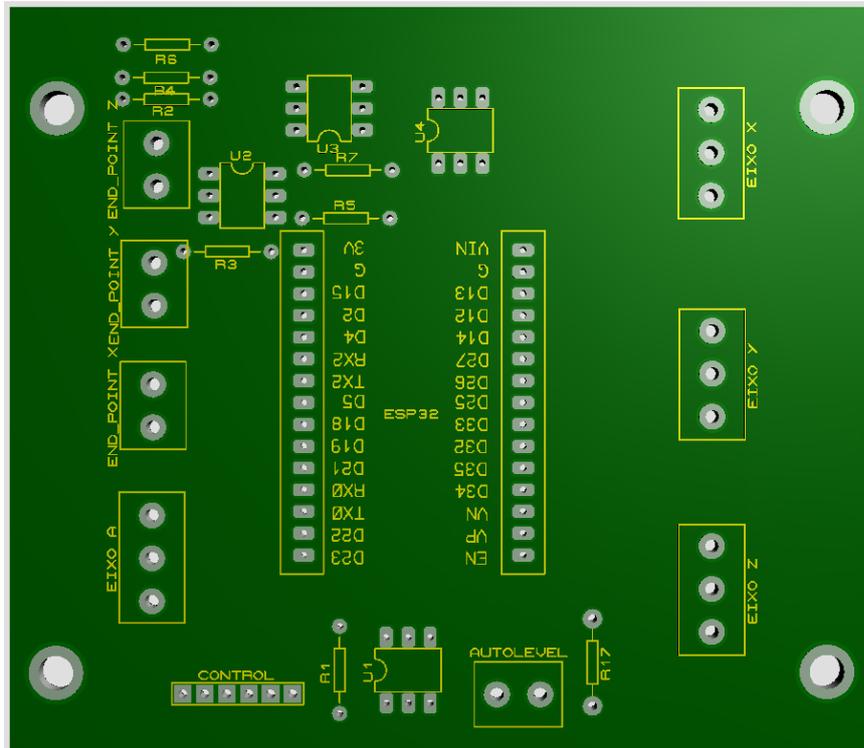
### **3.3.6 Placa Desenvolvida**

Visando uma maior versatilidade e adequação ao trabalho desenvolvido, optou-se por confeccionar uma placa para abrigar a plataforma de controle da fresadora. Foi utilizado o *software* Proteus para projetar a PCB, onde foram inseridos todos os componentes para então ser gerado o *layout* da placa.

Uma vez que decidiu-se utilizar *drivers* de grande volume para acionar os motores de passo, a placa desenvolvida deveria abrigar apenas a placa de desenvolvimento ESP32 DevKitC, alguns conjuntos de bornes para conexão dos terminais de controle para os drivers, das chaves fins de curso, da sonda de autonivelamento e de sinais de controle para o *spindle*, e os optoacopladores com respectivos resistores de *pull-up*, utilizados na filtragem de ruídos.

A Figura 43 mostra a visualização da placa de controle projetada, enquanto que o projeto eletrônico e *layout* da placa feitos no ISIS e ARES Proteus, respectivamente, encontram-se no Apêndice A no final deste documento.

Figura 43: Projeto da Placa de controle desenvolvida para a fresadora.



Fonte: (AUTOR, 2023).

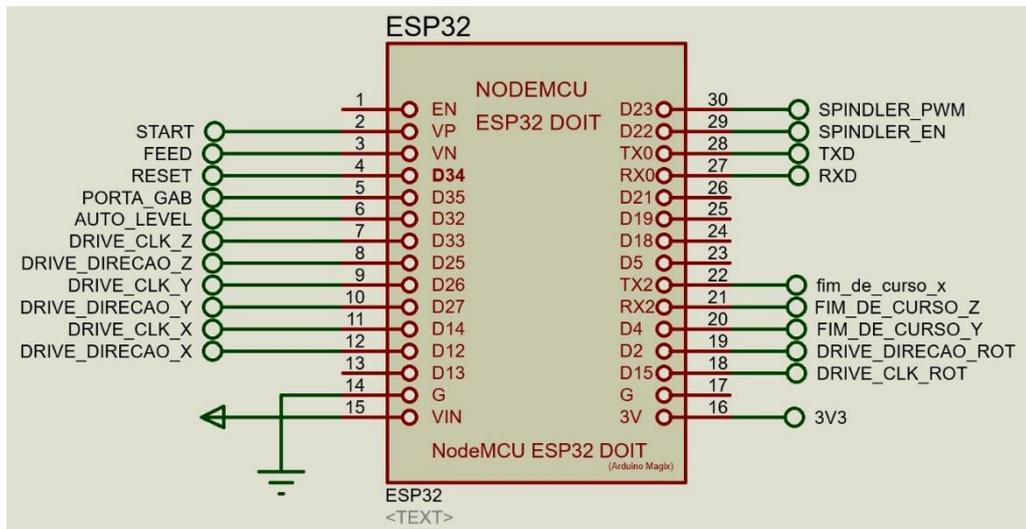
### 3.4 Software/Firmware

#### 3.4.1 GRBL ESP32

O GRBL foi desenvolvido para ser utilizado com a plataforma Arduino, no entanto, com o crescimento acelerado do uso das placas de desenvolvimento ESP32, foi adaptada uma versão do *firmware* para ser utilizado nestas placas. Utilizando uma placa ESP32, é possível fazer uso das funcionalidades presentes nestes módulos que o Arduino não possui, como Wi-Fi e Bluetooth nativo (BDRING/GRBL, 2023).

Para fazer uso deste *firmware*, foi feito o *download* o código fonte do GRBL\_ESP32 na sua página oficial no repositório do GitHub. Em seguida, utilizou-se um arquivo de exemplo para criar a configuração do *pinout* da placa, mostrada na Figura 44, de acordo com as variáveis que são utilizadas pelo GRBL.

Figura 44: Configuração dos pinos da ESP32 para o GRBL.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Ao ser inicializado pela primeira vez, o GRBL é configurado para prover um ponto de acesso Wi-Fi, o qual pode ser utilizado pelo usuário para se conectar à placa, e por meio do endereço IP 192.168.0.1, acessar o WebUi. O WebUi é uma plataforma online que permite fazer toda a configuração do GRBL e enviar comandos para a máquina utilizando o Wi-Fi (BDRING/GRBL, 2023).

Caso o usuário queira utilizar uma rede Wi-Fi existente para acessar o WebUi, é necessário fazer uma modificação no arquivo config.h do código fonte do GRBL, informando o SSID e a senha da rede desejada. Neste caso, recomenda-se conectar-se à ESP por um terminal serial para conferir se o endereço IP é o mesmo citado acima. Caso o ESP não consiga se conectar à rede informada no arquivo config.h, ela iniciará o seu próprio ponto de acesso (BDRING/GRBL, 2023).

### 3.4.2 Parametrização do GRBL

Para poder trabalhar com a fresadora, é necessário antes fazer a calibração e ajuste dos parâmetros de operação do GRBL, para que a máquina reproduza com exatidão os comandos *G-Code* enviados pelo *software* de controle. O GRBL possui diversos parâmetros para configurar o funcionamento da máquina, sendo que os principais para o desenvolvimento deste trabalho estão listados a seguir. A lista de

todos os parâmetros utilizados neste trabalho encontra-se no Apêndice C ao final deste documento.

#### **Parâmetro \$20: Habilitar Limites de *Software***

Este parâmetro habilita ou desabilita os limites da máquina via *software* (parâmetros \$130, \$131 e \$132), que servem para impedir que a máquina se movimente além de um valor determinado para cada eixo.

#### **Parâmetro \$21: Habilitar Limites de *Hardware***

Este parâmetro habilita ou desabilita os limites da máquina via *hardware*, que diz respeito ao uso de fins-de-curso. Vale salientar que quando essa opção está habilitada, a máquina sempre inicia em modo de alarme, sendo necessária a liberação manual por parte do usuário antes de ser feita qualquer movimentação.

#### **Parâmetro \$22: Habilitar Ciclo de *Homing***

Este parâmetro habilita ou desabilita o Ciclo de *Homing*, que é um procedimento em que a máquina utiliza os fins de curso pra se identificar a posição real da sua ferramenta. Neste ciclo a ferramenta percorre cada eixo até encontrar o respectivo fim de curso, e quando o contato ocorre, o GRBL tem certeza da posição real da ferramenta de trabalho. Este é um recurso muito utilizado para definir a origem da máquina. Como esta operação faz uso dos fins de curso, ela só pode ser feita se o parâmetro \$21 também estiver habilitado.

Para os primeiros testes de validação do trabalho, optou-se por desabilitar os parâmetros \$20, \$21 e \$22, sendo possível habilitá-los a qualquer momento.

#### **Parâmetros \$100, \$101 e \$102: Passos por milímetros**

Para que a máquina reproduza um movimento com a dimensão real que é enviada pelo *software* que a controla, é necessário que cada um dos 3 eixos esteja com a configuração adequada de quantos passos devem ser enviados pelo microcontrolador para que a ferramenta se mova 1 milímetro na respectiva direção. O cálculo deste valor leva em conta a resolução do motor, a configuração de micropassos escolhida no *driver* e o passo do fuso utilizado, conforme a Equação 3.1:

$$Passos/mm = \frac{Passos/Revolução \times Micropassos}{mm/Revolução} \quad (3.1)$$

Os 3 motores utilizados são iguais, com uma resolução de 200 passos/revolução, e nos 3 drivers optou-se por utilizar 2 micropassos (meio passo). Para o eixo Z, utilizou-se um fuso trapezoidal com avanço de 2 mm por revolução, logo utilizando a Equação 3.1, chega-se ao valor de 200 passos/mm, conforme a Equação 3.2:

$$Passos/mm = \frac{200 \times 2}{2} = 200 \quad (3.2)$$

Já para os eixos X e Y que utilizam os fusos originais da máquina, não se tinha conhecimento do avanço destes fusos, e realizou-se o seguinte ensaio para estimar este valor:

- Definiu-se o valor de 200 passos/mm para os eixos X e Y;
- Foi enviado para cada um destes eixos um comando de movimentação de 10 mm ( $10 \text{ mm} \times 200 \text{ Passos/mm} = 2000 \text{ Passos}$ );
- 2000 pulsos que chegam ao *driver* resultam em 1000 passos para o motor (devido à configuração de 2 micropassos feita no *driver*);
- 1000 passos no motor causam 5 revoluções ( $\frac{1000 \text{ passos}}{200 \text{ passos/revolução}} = 5 \text{ revoluções}$ );
- Mediu-se o deslocamento real da máquina para esta configuração, encontrando o valor de 30 mm;
- Logo, o avanço destes fusos é de:

$$Avanço = \frac{30 \text{ mm}}{5 \text{ revoluções}} = 6 \text{ mm/Revolução} \quad (3.3)$$

Portando, a configuração de passos/mm utilizada para os eixos X e Y foi de:

$$Passos/mm = \frac{200 \times 2}{6} = 66.67 \quad (3.4)$$

### **Parâmetros \$110, \$111 e \$112: Velocidade máxima**

Estes parâmetros definem uma velocidade máxima de deslocamento em mm/min para cada um dos eixos. Este é um valor importante pois implicará diretamente no tempo que a máquina leva para realizar os seus trabalhos. No entanto, este valor não pode ser alto demais pois, se for solicitado ao motor uma movimentação

rápida demais ele pode não conseguir realizar o movimento com a precisão necessária, e com isso “perder passo”. Após testes realizados, definiu-se um limite de 1200 mm/min para os eixos X e Y e de 400 mm/min para o eixo Z.

#### **Parâmetros \$120, \$121 e \$122: Aceleração**

Estes parâmetros definem a aceleração em mm/seg<sup>2</sup> para cada um dos eixos. Este é um valor importante pois define a suavidade com que o motor inicia e finaliza seus movimentos. Após testes realizados, definiu-se um limite de 100 mm/seg<sup>2</sup> para os 3 eixos.

#### **Parâmetros \$130, \$131 e \$132: Limites de Software**

Estes parâmetros definem via *software* um limite para a movimentação máxima da máquina, para evitar que a máquina tente se mover além dos seus limites físicos (comprimento total das guias e dos fusos). Estes limites só são levados em consideração se o parâmetro \$20 (*Soft Limits Enable*) estiver habilitado.

## 4 TESTES

Uma vez finalizada a montagem da máquina e parametrização do *software* de controle, foram feitos alguns testes com progressivo grau de complexidade para verificar a capacidade da fresadora.

Os primeiros testes foram feitos em MDF com uma fresa de 1 mm. Utilizou-se o *software SketchUp* com *plug-in SkecthUcam* para gerar um *G-Code* de gravação com geometrias simples, composto por um quadrado, um círculo e um octógono. O objetivo deste primeiro teste era verificar a movimentação da máquina em traçados retos na direção dos eixos, e em traçados diagonais e circulares.

Obtido sucesso neste teste, criou-se da mesma forma um percurso de gravação da palavra “Jesus” com uma fonte detalhada, elevando o grau de complexidade do trabalho. A Figura 45 mostra o resultado destes primeiros testes.

Figura 45: Primeiros testes feitos de gravação em MDF.



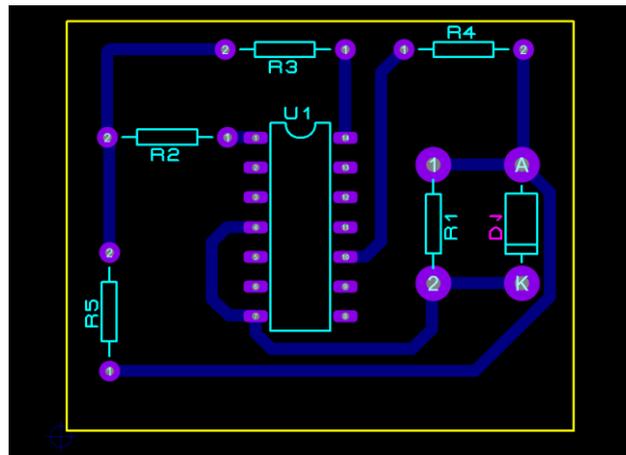
Fonte: (AUTOR, 2023).

Por fim, para validar a efetividade da fresadora em realizar sua atividade original, a confecção de PCBs, foram feitos os seguintes procedimentos.

## 4.1 Proteus

Utilizou-se o *software* Proteus para criar um projeto simples de uma PCB genérica, mostrada na Figura 46, apenas com o intuito de testar a capacidade da fresadora em confeccionar as trilhas, furos e o corte da placa com a precisão requerida.

Figura 46: Projeto de PCB para teste feito no ARES Proteus.



Fonte: (AUTOR, 2023).

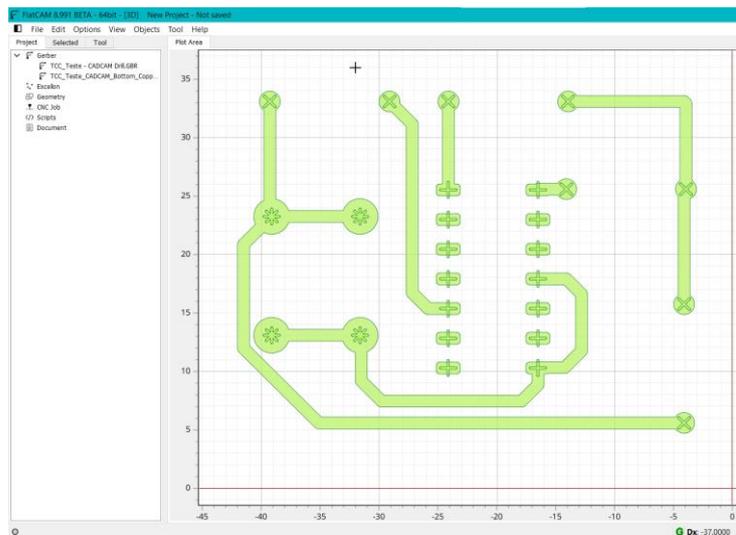
A partir deste arquivo, foram gerados 2 arquivos Gerber: um com os percursos das trilhas e outro com os furos, para serem utilizados no FlatCAM.

## 4.2 FlatCAM

De posse dos arquivos Gerber gerados no Proteus, utilizou-se o *software* FlatCAM para criar os arquivos *G-Code* necessários para a confecção da PCB. A Figura 47 mostra a tela deste *software* com os arquivos Gerber referentes às trilhas e aos furos. O FlatCAM utiliza as informações contidas no Gerber, que é um arquivo vetorial de imagem, para os percursos de gravação, corte e perfuração. É neste *software* que são feitas as configurações referentes à máquina utilizada, como informações da fresa, velocidade de movimentação e profundidade de mergulho da fresa no material. Optou-se por fazer este trabalho em 4 etapas, gerando um arquivo *G-Code* para cada um, onde em cada etapa é utilizada uma ferramenta diferente, como descrito a seguir:

1. Confeção das trilhas: Fresa V-Bit de 0.2 mm e angulação de 45°;
2. Confeção dos furos menores: Broca de 0.8 mm;
3. Confeção dos furos maiores: Fresa de 1.0 mm;
4. Corte da placa: Fresa de 2.0 mm.

Figura 47: Tela do FlatCAM com os arquivos Gerber abertos.

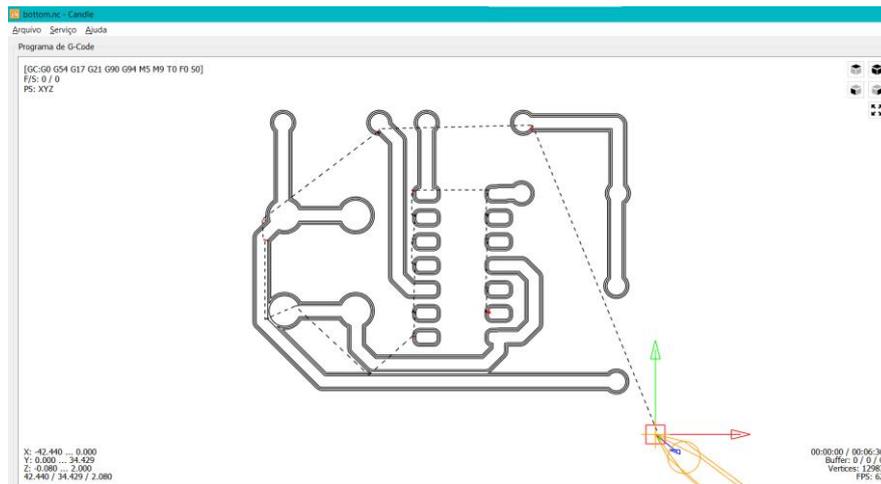


Fonte: (AUTOR, 2023).

### 4.3 Candle

Uma vez criados os arquivos *G-Code*, optou-se por utilizar o terminal serial Candle para ser a interface de comunicação com a fresadora. O Candle é um *software* gratuito, possui uma interface limpa e com diversos recursos úteis à usinagem CNC, tais como um visualizador de arquivos *G-Code*, terminal serial para o envio direto de comandos, botões de movimentação dos 3 eixos, ferramentas de controle do *Spindle*, autonivelamento, entre outros (DENVI/CANDLE, 2015). A Figura 48 mostra a tela do Candle com o arquivo do primeiro percurso aberto, a confecção das trilhas.

Figura 48: Tela do Candle com o G-Code do primeiro percurso de gravação.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Para ser feita a usinagem, deve-se fixar o objeto de trabalho na mesa (neste caso, a placa de fenolite). Para trabalhos que envolvem a perfuração ou corte total do material, como ocorre neste caso, é interessante utilizar uma “tábua de sacrifício” para fixar o objeto, afim de não danificar a mesa nem a ferramenta utilizada quando esta atravessar por completo o material. Para este trabalho, utilizou-se a placa de MDF utilizada nos primeiros testes como tábua de sacrifício, fazendo uso de fita dupla face para prender a placa de fenolite a ela.

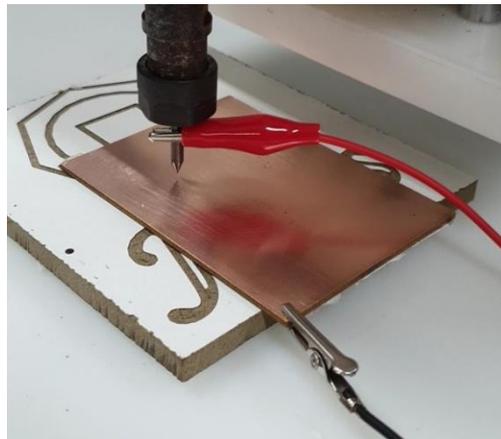
Antes de iniciar a usinagem de fato, é preciso informar para a máquina onde fica a origem (o ponto Zero) do trabalho a ser executado, de forma que a posição real da ponta da fresa sobre a superfície da placa de fenolite coincida com a origem do arquivo *G-Code* aberto. Esta etapa é uma das mais importante, pois se a ferramenta não estiver devidamente posicionada, a usinagem não ocorrerá como desejado, e no pior dos casos pode haver algum acidente como por exemplo a quebra da fresa em uso.

Para isso, utiliza-se os controles do Candle de movimentação individual de cada um os eixos para posicionar a fresa no ponto em que se deseja utilizar como origem. Para zerar as coordenadas nos eixos X e Y é mais simples, uma vez que a placa utilizada para a usinagem é muito menor que a placa que se deseja confeccionar, um posicionamento a olho nu é suficiente para garantir que todo trabalho seja realizado dentro da área útil prevista. Já o eixo Z, que exige uma precisão na ordem dos 10  $\mu\text{m}$ , necessita de um processo mais ajustado de definição do seu ponto zero.

#### 4.4 Proble

Para garantir um posicionamento preciso do eixo Z se utiliza o probe, uma espécie de sonda que permite o GRBL identificar quando a fresa entra em contato com o material a ser usinado e. O GRBL entende que o probe foi acionado quando a sua entrada lógica entra em contato com o terra (0 V). Sendo assim, para fazer uso desse mecanismo para PCBs, basta utilizar um par de conectores, onde um fará contato com a fresa e o outro com a superfície de cobre da placa de fenolite, como mostra a Figura 49. Uma das extremidades destes conectores deve ser ligada ao Terra do Microcontrolador e o outro na entrada referente ao probe (que neste caso está no pino D32 da ESP), desta forma, como todos são condutores, quando a ponta da fresa entrar em contato com a placa, o GRBL será notificado pelo fechamento do circuito, e assim é possível definir com extrema precisão o nível zero do eixo Z.

Figura 49: Ligações feitas para o uso do probe.

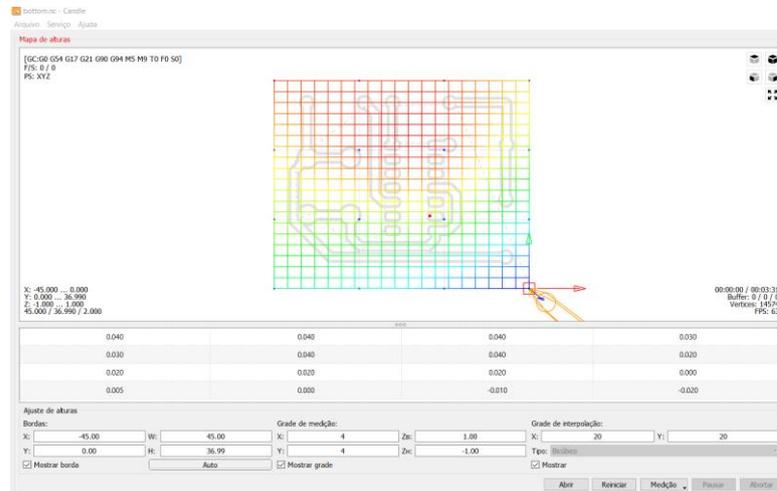


Fonte: (AUTOR, 2023).

O Candle possui um recurso muito interessante capaz de corrigir desníveis e imperfeições na altura da placa. Este se trata de um autonivelamento, que utiliza do probe para fazer um mapeamento da altura da placa, em uma quantidade predeterminada de pontos ao longo da superfície do material. Uma vez feito este nivelamento, é gerado um mapa de alturas, que pode ser aplicado sobre o arquivo *G-Code* aberto para que o *software* faça a compensação das diferenças de altura

encontradas. Neste teste, tratando-se de uma placa de dimensões muito pequenas, optou-se por fazer o nivelamento com apenas 12 pontos, como mostra a Figura 50.

Figura 50: Mapa de altura criado a partir da sonda de autonivelamento.

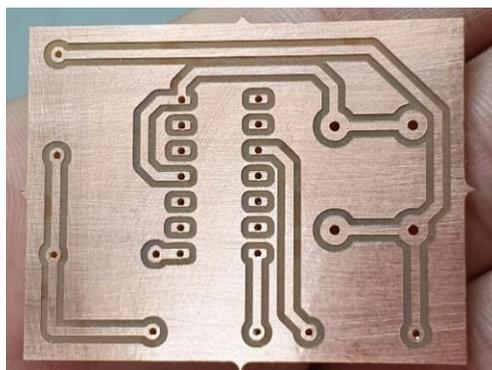


Fonte: (AUTOR, 2023).

O mapa criado foi aplicado sobre os 4 arquivos *G-Code* anteriormente criados, sendo necessário apenas a nova calibração do zero do eixo Z a cada troca de fresa/broca realizada. Após realizadas as 4 operações sobre a placa de fenolite, o resultado final foi a PCB mostrada na Figura 51.

A máquina conseguiu reproduzir com fidelidade os percursos criados via *software*, a espessura das linhas que isolam as ilhas e as trilhas ficou uniforme, e os furos e o corte conseguiram atravessar por completo o material.

Figura 51: Resultado final da PCB criada.



Fonte: (AUTOR, 2023).

## 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir, primeiramente, que o projeto de reabilitação da fresadora foi um sucesso, visto que o objetivo principal do trabalho que era realizar as adaptações necessárias para tornar a máquina novamente apta a confeccionar PCBs foi atingido.

Segundamente, provou-se que a fresadora ficou com um nível de robustez que permite executar trabalhos que vão além da confecção de PCBs em fenolite, como se provou com a gravação de entalhes em MDF. Munida de uma fresa adequada, esta máquina deve ser capaz de realizar trabalhos semelhantes em outros materiais leves, tais como acrílico e PEAD, frequentemente utilizados em projetos de engenharia como foi o caso deste.

Conclui-se também que, a utilização de componentes encontrados no mercado nacional (sejam eles mecânicos ou eletrônicos) se mostra uma opção extremamente viável para a solução de problemas de engenharia. Neste trabalho, uma máquina de alto valor aquisitivo, que para ser consertada pelo fabricante demandaria uma quantia elevada, pôde ser restaurada por meio do trabalho de um único aluno sob a orientação e supervisão de um docente bem instruído.

A realização deste trabalho foi de suma importância para o aprendizado e desenvolvimento profissional do autor, pois permitiu a aplicação direta de muitos conceitos aprendidos ao longo da graduação em Engenharia de Controle e Automação. Além da utilização de conhecimentos mais intimamente ligados ao curso, como microcontroladores, circuitos elétricos e eletrônica digital, foi possível expandir o conhecimento em outras áreas como mecânica, física e modelagem computacional.

Uma vez restaurada, esta fresadora CNC agrega um valor muito grande para o DEE-UFPE, podendo ser amplamente utilizada no apoio às atividades de ensino e de pesquisa do DEE. Mesmo que a máquina esteja apta para o uso, nada impede que novos projetos de melhoria sejam feitos sobre a mesma, buscando sempre elevar o desempenho, a precisão e a vida útil do equipamento.

## REFERÊNCIAS

- AMAZON. KKcare 500mw desktop DIY máquina de gravura a laser CNC gravador escultor impressora a laser com óculos de proteção para escultura corte e gravura. **Amazon**, 2023. Disponível em: <[https://m.media-amazon.com/images/I/613ita1seuL.\\_AC\\_SX300\\_SY300\\_QL70\\_ML2\\_.jpg](https://m.media-amazon.com/images/I/613ita1seuL._AC_SX300_SY300_QL70_ML2_.jpg)>. Acesso em: 08 Julho 2023.
- AMAZON. Polia silenciosa de correia dentada de bloco de polia pequeno GT2. **Amazon**, 2023. Disponível em: <[https://m.media-amazon.com/images/I/517HFUYsXgL.\\_AC\\_UF894,1000\\_QL80\\_.jpg](https://m.media-amazon.com/images/I/517HFUYsXgL._AC_UF894,1000_QL80_.jpg)>. Acesso em: 11 Junho 2023.
- AMAZON. Trilho linear 2 unidades 300mm 12mm Suporte de trilho linear 4 unidades Bloco deslizante de rolamento. **Amazon**, 2023. Disponível em: <[https://m.media-amazon.com/images/I/61e6aaQsPJL.\\_AC\\_UF894,1000\\_QL80\\_.jpg](https://m.media-amazon.com/images/I/61e6aaQsPJL._AC_UF894,1000_QL80_.jpg)>. Acesso em: 11 Junho 2023.
- ARDUINO. What is Arduino? **Arduino**, 05 Fevereiro 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 08 Julho 2023.
- ARDUINO. Arduino Uno Rev3 - Arduino Online Shop. **Arduino Online Shop**, 2023. Disponível em: <<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3?selectedStore=us>>. Acesso em: 08 Julho 2023.
- AUTOMAÇÃO, Kalatec. Tornos CNC: o que é, como funciona, vantagens e tipos. Acesse! **Blog - Kalatec Automação**, 2023. Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/tornos-cnc/>>. Acesso em: 05 Junho 2023.
- BARRETO, Rita A. A. Projeto detalhado de uma máquina CNC Router, 18 Abril 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/5112>>.
- BDRING/GRBL. GitHub - bdring/Grbl\_Esp32: A port of Grbl CNC Firmware for ESP32. **GitHub - bdring/Grbl\_Esp32**, 2023. Disponível em: <[https://github.com/bdring/Grbl\\_Esp32](https://github.com/bdring/Grbl_Esp32)>. Acesso em: 11 Julho 2023.
- BRITES, Felipe G.; SANTOS, Vinícius P. D. A. Motor de passo. **Programa de Educação Tutorial**, Niterói-RJ, 10, 2008.
- CACPNRJ. Como controlar um motor de stepper com driver A4988 e Arduino. **Cap Sistema**, 01 Abril 2022. Disponível em: <<https://capsistema.com.br/index.php/2022/04/01/como-controlar-um-motor-de-stepper-com-driver-a4988-e-arduino/>>. Acesso em: 15 Agosto 2023.
- CHAMPLAIN, John; WOODCOCK, Jeff. Understanding Gcode Commands, Fevereiro 2015. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.picengrave.com/Pic%20Programs%20Page/PDF%20Files/misc/Understanding%20Gcode.pdf>>.
- CHIANG, L.E.; RAMOS, J. CNC control of a laser cutting machine. **Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'94)**, Santiago, 25-27 Maio 1994.
- CNC, Impacto. Fuso Trapezoidal TR8 passo 8mm x 1000mm c/ Castanha - Impacto CNC. **Impacto CNC**, 2023. Disponível em: <<https://www.impactocnc.com/fuso-trapezoidal-tr8-passo-8-300mm-thsl-300-8d-backlash>>. Acesso em: 11 Junho 2023.
- CONRADO, Rodrigo. GRBL v0.9j: O que é? Para quê serve? Como configurar? **Atividade Maker**, 2016 Maio 23. Disponível em: <<https://atividademaker.com.br/grbl-v09j>>. Acesso em: 31 Julho 2023.

CONSTANDINOU, Timothy G. Tudo sobre motores de passo, Santa Maria, 2005.

CUNICO, Marlon W. M. **Impressoras 3D: O novo Meio Produtivo**.

DENVI/CANDLE. Home Denvi/Candle Wiki GitHub. **GitHub**, 15 Agosto 2015. Disponível em: <<https://github.com/Denvi/Candle/wiki>>. Acesso em: 20 Agosto 2023.

DHGATE. Ferramentas DC 12-48V 300W Ar resfriado a ar CNC DC Motor do fuso ER11 Chuck 55mm Grampo para máquina de moagem de PCB diy. **DHgate**, 2023. Disponível em: <<https://www.dhresource.com/webp/m/0x0/f2/albu/g15/M00/F9/2B/rBVa3WAOpeaAEV7QAA MGmRqrQM399.jpg>>. Acesso em: 11 Junho 2023.

DRGONA, Peter; STEFUN, Rastislav. Application of Stepper Motors in CNC Device. **2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)**, Iasi, Romênia, 18-19 Outubro 2018. 241-246.

DUTRA. Arduino Uno, ESP32 e Raspberry – Automação. **Oficina da Robótica | Universo Maker**, 29 Abril 2023. Disponível em: <<http://oficinadarobotica.com.br/arduino-uno-esp32-e-raspberry-automacao/#:~:text=Mem%C3%B3ria%20e%20Armazenamento%3A%20O%20ESP32,e%2032KB%20de%20armazenamento%20flash.>>. Acesso em: 30 Agosto 2023.

ESPINEL, Jorge. Getting Started with CNC Milling: Process, Terms, Workflow & Operations, 2023. Disponível em: <<https://www.fictiv.com/articles/cnc-milling-introduction>>. Acesso em: 05 Junho 2023.

ESPRESSIF. ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide. **ESPRESSIF**, 2023. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>>. Acesso em: 08 Julho 2023.

FLATCAM. FlatCAM: PCB Prototyping CAD/CAM. **FlatCAM**, 2023. Disponível em: <<http://flatcam.org/>>. Acesso em: 15 Agosto 2023.

FTSHOPPING. Gravador CNC Two Trees 3018 PRO | FTSHOPPING. **FTSHOPPING**, 2023. Disponível em: <<https://www.ftshopping.pt/product/gravador-cnc-two-trees-3018-pro>>. Acesso em: 27 Junho 2023.

GNEA/GRBL. Home gnea/grbl Wiki GitHub. **GitHub - gnea/grbl**, 2023. Disponível em: <<https://github.com/gnea/grbl/wiki>>. Acesso em: 27 Junho 2023.

GROOVER, Mikell P. **Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing**. 4th. ed.

HASAN, Yousif M.; SHAKIR, Layth F.; NAJI, Hassan H. Implementation and Manufacturing of a 3-Axes Plotter Machine by Arduino and CNC Shield. **2018 International Conference on Engineering Technology and their Applications (IICETA)**, Al-Najaf, Iraq, 08-09 Maio 2018. 25-29.

INDUSTRIAIS, Soluções. Fuso de Esferas - Rosa do Brasil. **Soluções Industriais**, 2023. Disponível em: <[https://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens\\_10231/fuso\\_de\\_esferas\\_02-38-20.jpg](https://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_10231/fuso_de_esferas_02-38-20.jpg)>. Acesso em: 11 Junho 2023.

KALATEC. Kalatec Automação - Eixo retificado aço cromo 40mm - LM40UU. **KALATEC Automação**, 2023. Disponível em: <<https://cdn-eboei.nitrocdn.com/SPVaHMdSfBkdZDivFueVfFpSafWWgvSU/assets/images/optimized/rev-e71c8a5/wp-content/uploads/2019/07/eixos-lineares.jpeg>>. Acesso em: 11 Junho 2023.

LI, Will. Papel do arquivo Gerber na fabricação de PCB. **Moko Technology**, 28 Abril 2020. Disponível em: <<https://www.mokotechnology.com/pt/gerber-file/>>. Acesso em: 15 Agosto 2023.

LI, Youhua et al. Research on Operation and Maintenance Technology of Rack and Pinion Transmission System of Three Gorges Ship Lift. **2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture**, Manchester, UK, 23-25 Outubro 2021.

LPKF. LPKF ProtoMat S103 Manuals. **manualslib**, 28 Março 2011. Disponível em: <<https://www.manualslib.com/products/Lpkf-Protomat-S103-8939520.html>>. Acesso em: 2023 Agosto 30.

MAEDA, Osamu; CAO, Yuzhong; ALTINTAS, Yusuf. Expert spindle design system. **International journal of Machine tools and Manufacture**, n. 45, 2005. 537-548.

MAKERHERO. CNC Shield V3 para Arduino - MakerHero. **MakerHero**, 2023. Disponível em: <<https://www.makerhero.com/produto/cnc-shield-v3-para-arduino-impressora-3d/>>. Acesso em: 03 Julho 2023.

MCCRANIE, Jud. **Punched paper tape roll - Punched tape - Wikipedia**, 1 Abril 2022. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Punched\\_tape#/media/File:Punched\\_paper\\_tape\\_roll.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Punched_tape#/media/File:Punched_paper_tape_roll.jpg)>. Acesso em: 05 Junho 2023.

MECTROL. Informações sobre Guias Lineares/HGH20CAZAC 20mm HIWIN Guia Linear bloco HGH20CA. **Mectrol Automação e Robótica**, 2023. Disponível em: <[https://mectrol.com.br/imgcache/2150/1000x/uploads/2150/product/photo\\_5fc6920d57750.jpg.webp](https://mectrol.com.br/imgcache/2150/1000x/uploads/2150/product/photo_5fc6920d57750.jpg.webp)>. Acesso em: 11 Junho 2023.

MEDEIROS, Gustavo. Definições de Termos e Histórico dos Microcontroladores, Recife, Setembro 2014.

MINEBEA-MATSUSHITA, 2012. Disponível em: <[https://http2.mlstatic.com/D\\_NQ\\_NP\\_676208-MLA49337954468\\_032022-O.webp](https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_676208-MLA49337954468_032022-O.webp)>. Acesso em: 22 Junho 2023.

MISCHIANTI, Renzo. DOIT ESP32 DEV KIT v1 high resolution pinout and specs. **Renzo Mischianti Electronic, 3D printing and embedded programming**, 13 Janeiro 2023. Disponível em: <<https://mischianti.org/wp-content/uploads/2020/11/ESP32-DOIT-DEV-KIT-v1-pinout-mischianti.png>>. Acesso em: 19 Agosto 2023.

OLIVEIRA, AUGUSTO D. N. D. DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA CNC A LASER PARA CORTE E GRAVAÇÃO, Recife-PE, 26 Outubro 2022. 80. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/47387>>.

OLIVEIRA, Nina C. Adaptação de robô cartesiano para máquina de corte a laser, Uberlândia-MG, 13 Março 2020.

ORLANDO, Alex J.; FILHO, Ramilio R. EVOLUÇÃO DO COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO. **Revista Interface Tecnológica**, 30 jul. 2021. 606–617. Disponível em: <<https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1153>>. Acesso em: 30 Julho 2023.

OVERBY, Alan. **CNC Machining Handbook: Building, Programming, and Implementation**.

PENIDO, Édilus D. C. C.; TRINDADE, Ronaldo S. **Microcontroladores**.

PROJETOS, JDR. ROUTER CNC - A4040 JDR Projetos CNC e Componentes. **JDR Projetos**, 2023. Disponível em: <<https://www.jdrprojetos.com.br/router-cnc-jdr-a4040>>. Acesso em: 27 Junho 2023.

ROBOCORE. Robocore.net. **RoboCore**, 2023. Disponível em: <[https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/291/images/291\\_3\\_H.png?20230328145128](https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/291/images/291_3_H.png?20230328145128)>. Acesso em: 11 Junho 2023.

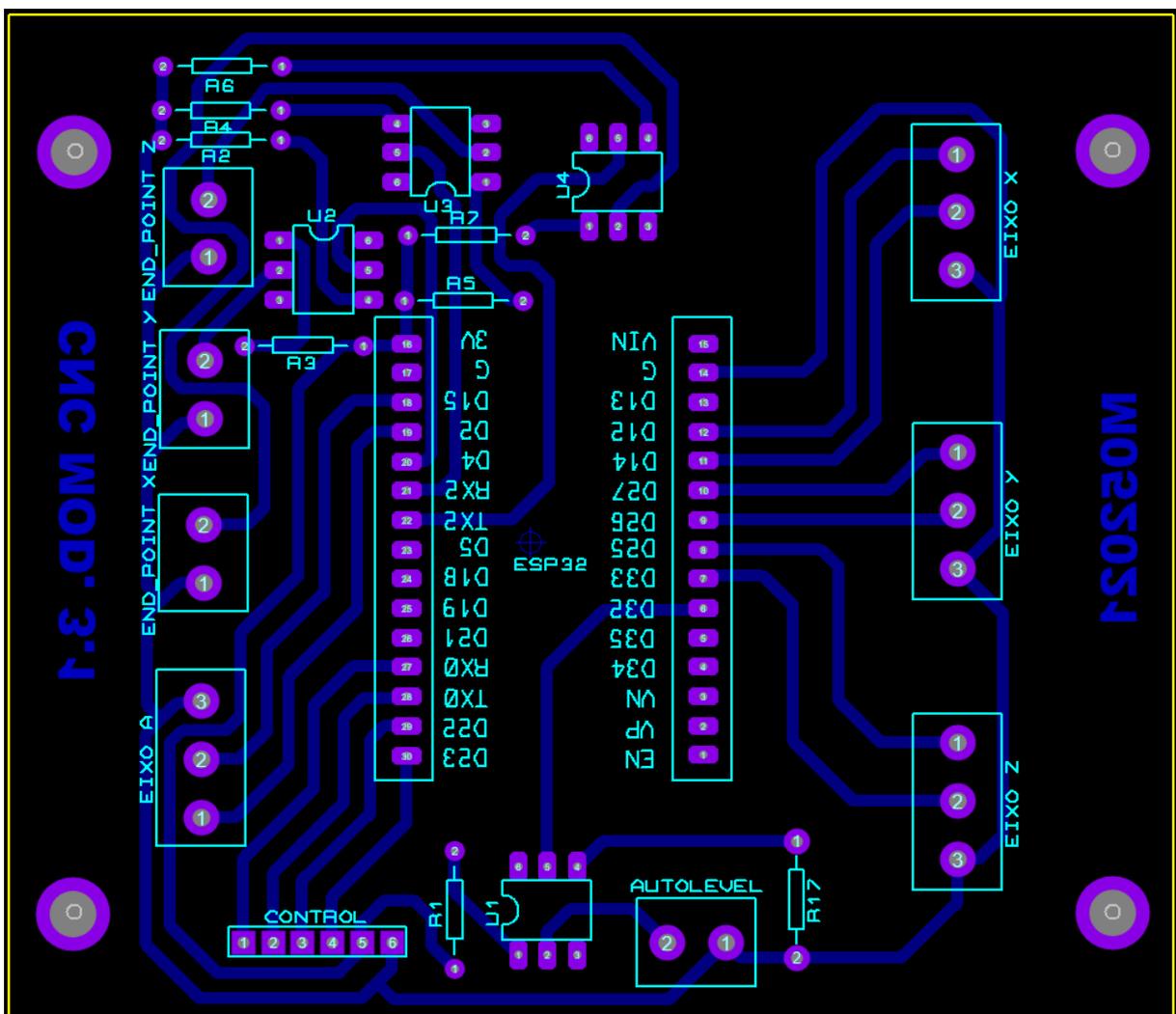
- ROBÓTICA, AutoCore. Chave Micro Switch KW11-7-3 3T - AutoCore Robótica. **AutoCore Robótica**, 2023. Disponível em: <<https://www.autocorerobotica.com.br/chave-micro-switch-kw11-7-3-2t>>. Acesso em: 20 Agosto 2023.
- SANCHES, Leonardo; PEREIRA, Luís G. PROJETO PARA DESENVOLVIMENTO DE UMA FRESA CNC COMANDADA POR UMA PLACA ARDUINO, Taubaté, SP, 11 Novembro 2017. 60.
- SARGUROH, Sakib S.; RANE, Arun B. Using GRBL-Arduino-based controller to run a two-axis computerized numerical control machine. **2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET)**, Mumbai, Índia, 05 Janeiro 2018.
- SCHMID, Steven; KALPAKJIAN, Serope. **Manufacturing Engineering & Technology**. 7th. ed.
- SILVA, Frank F. D.; GALDINO, Luciano; FERNANDES, João C. L. APLICAÇÃO DE SENSORES INDUTIVOS E CHAVES FIM DE CURSO EM FERRAMENTAS DE ESTAMPAGEM COMO FORMA DE SEGURANÇA E PRECISÃO DIMENSIONAL. **Augusto Guzzo Revista Acadêmica**, São Paulo-SP, n. 17, 09 Julho 2016. 189-201. Disponível em: <[http://fics.edu.br/index.php/augusto\\_guzzo/article/view/306](http://fics.edu.br/index.php/augusto_guzzo/article/view/306)>. Acesso em: 06 Julho 2023.
- SILVA, J. P. B. D. Projeto e construção de uma Router CNC, Recife-PE, 2018.
- SILVEIRA, Cristiano B. O que é PWM e Para que Serve? **Citisystems**, 26 Novembro 2016. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/pwm/>>. Acesso em: 27 Agosto 2023.
- SMARTKITS. Driver Controlador TB6600. **SmartKits**, 2023. Disponível em: <[https://images.tcdn.com.br/img/img\\_prod/751846/driver\\_controlador\\_tb6600\\_1755\\_3\\_20201202141209.jpg](https://images.tcdn.com.br/img/img_prod/751846/driver_controlador_tb6600_1755_3_20201202141209.jpg)>. Acesso em: 15 Agosto 2023.
- SMID, Peter. **CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming**. 2nd. ed.
- SMID, Peter. **CNC Control Setup for Milling and Turning: Mastering CNC Control Systems**.
- STOICA, A.; STAN, G. Influence of the ball screw stiffness on the positioning accuracy of the CNC machine tools. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Eforie Nord, Romania, 1182, 23-26 Junho 2021.
- SUTILLI, Jofre. Projeto de mecanismo de transmissão para uma roda sem a utilização de raios, 18 Dezembro 2014. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/15134>>.
- TECMAF. Cremalheira Helicoidal módulo 2 - COMPONENTES TECMAF. **COMPONENTES TECMAF**, 2023. Disponível em: <<https://componentes.tecmaf.com.br/cremalheira-helicoidal-modulo-2/>>. Acesso em: 11 Junho 2023.
- TECMAF. MOTOR DE PASSO NEMA 34 35KGF.CM - COMPONENTES TECMAF. **TECMAF Componentes**, 2023. Disponível em: <[https://componentes.tecmaf.com.br/wp-content/uploads/2019/07/TMA.MPHS\\_.34035.04-1-site.png](https://componentes.tecmaf.com.br/wp-content/uploads/2019/07/TMA.MPHS_.34035.04-1-site.png)>. Acesso em: 11 Junho 2023.
- TOUCH, 3D. Impressora 3D Creality Ender 3 S1 Pro. **3D Touch**, 2023. Disponível em: <<https://loja.3dtouch.com.br/wp-content/uploads/2023/05/Ender-3-S1-Pro-Image-2.png>>. Acesso em: 20 Agosto 2023.
- WANG, Marko. Os 10 melhores softwares de design de PCB para trabalhar em 2022. **PCBMay**, 11 Junho 2021. Disponível em: <<https://www.pcbmay.com/pt/melhor-software-de-design-pcb-para-trabalhar/>>. Acesso em: 30 Julho 2023.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Projeto eletrônico da placa de controle desenvolvida.

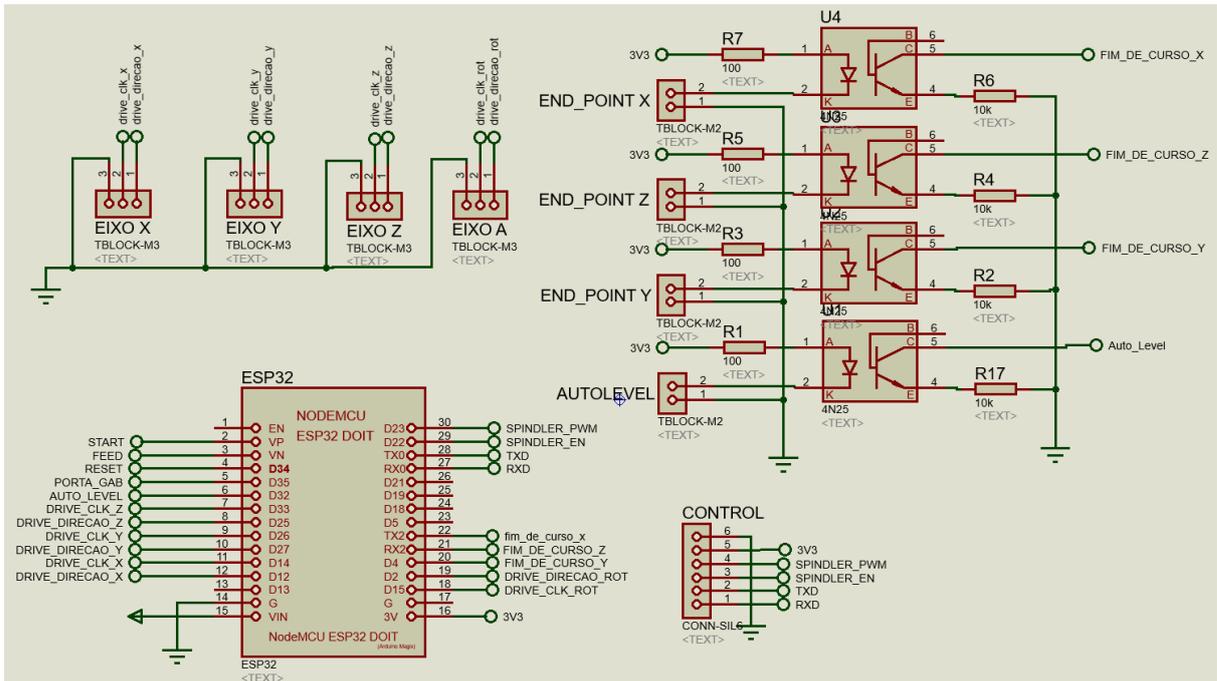
A Figura 52 mostra o projeto do layout da placa de controle desenvolvida, criada no ARES Proteus a partir do diagrama elétrico mostrado na Figura 53, desenvolvido no ISIS Proteus.

Figura 52: Projeto eletrônico da placa de controle, desenvolvido no ARES Proteus.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Figura 53: Diagrama elétrico da placa de controle, desenvolvido no ISIS Proteus.



Fonte: (AUTOR, 2023).

## APÊNDICE B – Arquivo de configuração da pinagem da ESP32 para o GRBL.

Figura 54: Arquivo de configuração da pinagem da ESP32 para o GRBL.

```

C 4axis_v1_MECB.h
D: > Documentos > Grbl_Esp32-main_MECB > Grbl_Esp32 > src > Machines > C 4axis_v1_MECB.h
29 #define MACHINE_NAME "ESP32_V4"
30
31 #define X_STEP_PIN GPIO_NUM_14 //12
32 #define X_DIRECTION_PIN GPIO_NUM_12 //14
33 #define Y_STEP_PIN GPIO_NUM_26 //27
34 #define Y_DIRECTION_PIN GPIO_NUM_27 //15
35 #define Z_STEP_PIN GPIO_NUM_33 //27
36 #define Z_DIRECTION_PIN GPIO_NUM_25 //33
37 #define A_STEP_PIN GPIO_NUM_15 //21
38 #define A_DIRECTION_PIN GPIO_NUM_2 //25
39
40 #define X_LIMIT_PIN GPIO_NUM_17
41 #define Y_LIMIT_PIN GPIO_NUM_4
42 #define Z_LIMIT_PIN GPIO_NUM_16
43
44 // OK to comment out to use pin for other features
45 #define STEPPERS_DISABLE_PIN GPIO_NUM_13
46
47 #define SPINDLE_TYPE SpindleType::PWM
48 #define SPINDLE_OUTPUT_PIN GPIO_NUM_23 // labeled SpinPWM
49 #define SPINDLE_ENABLE_PIN GPIO_NUM_22 // labeled SpinEnbl
50
51 // #define COOLANT_MIST_PIN GPIO_NUM_21 // labeled Mist
52 // #define COOLANT_FLOOD_PIN GPIO_NUM_25 // labeled Flood
53 #define PROBE_PIN GPIO_NUM_32 // labeled Probe

```

Fonte: (AUTOR, 2023).

## APÊNDICE C – Parâmetros do GRBL utilizados na operação da máquina.

\$0 = 10 (Step pulse time, microseconds)  
 \$1 = 250 (Step idle delay, milliseconds)  
 \$2 = 0 (Step pulse invert, mask)  
 \$3 = 1 (Step direction invert, mask)  
 \$4 = 0 (Invert step enable pin, boolean)  
 \$5 = 0 (Invert limit pins, boolean)  
 \$6 = 1 (Invert probe pin, boolean)  
 \$10 = 1 (Status report options, mask)  
 \$11 = 0.010 (Junction deviation, millimeters)  
 \$12 = 0.002 (Arc tolerance, millimeters)  
 \$13 = 0 (Report in inches, boolean)  
 \$20 = 0 (Soft limits enable, boolean)  
 \$22 = 0 (Homing cycle enable, boolean)  
 \$21 = 0 (Hard limits enable, boolean)  
 \$23 = 0 (Homing direction invert, mask)  
 \$24 = 200.000 (Homing locate feed rate, mm/min)  
 \$25 = 500.000 (Homing search seek rate, mm/min)  
 \$26 = 250.000 (Homing switch debounce delay, milliseconds)  
 \$27 = 1.000 (Homing switch pull-off distance, millimeters)  
 \$30 = 1000.000 (Maximum *spindle* speed, RPM)  
 \$31 = 0.000 (Minimum *spindle* speed, RPM)  
 \$32 = 0 (Laser-mode enable, boolean)  
 \$100 = 66.667 (X-axis travel resolution, step/mm)  
 \$101 = 66.667 (Y-axis travel resolution, step/mm)  
 \$102 = 200.000 (Z-axis travel resolution, step/mm)  
 \$110 = 1200.000 (X-axis maximum rate, mm/min)  
 \$111 = 1200.000 (Y-axis maximum rate, mm/min)  
 \$112 = 400.000 (Z-axis maximum rate, mm/min)  
 \$120 = 100.000 (X-axis acceleration, mm/sec<sup>2</sup>)  
 \$121 = 100.000 (Y-axis acceleration, mm/sec<sup>2</sup>)  
 \$122 = 100.000 (Z-axis acceleration, mm/sec<sup>2</sup>)  
 \$130 = 300.000 (X-axis maximum travel, millimeters)  
 \$131 = 220.000 (Y-axis maximum travel, millimeters)  
 \$132 = 140.000 (Z-axis maximum travel, millimeters)