



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

AUGUSTO DERLIAN NASCIMENTO DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA CNC A LASER PARA CORTE E  
GRAVAÇÃO**

Recife

2022

AUGUSTO DERLIAN NASCIMENTO DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA CNC LASER PARA CORTE E GRAVAÇÃO**

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. Marcio Evaristo da Cruz Brito

Recife

2022

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

Oliveira, Augusto Derlian Nascimento de.  
Desenvolvimento de máquina CNC LASER para corte e gravação / Augusto  
Derlian Nascimento de Oliveira. - Recife, 2022.  
79p : il., tab.

Orientador(a): Marcio 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, 2022.  
Inclui referências, apêndices.

1. CNC. 2. GRBL. 3. LASER. 4. Corte. 5. Gravação. I. Brito, Marcio  
Evaristo da Cruz. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

AUGUSTO DERLIAN NASCIMENTO DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MÁQUINA CNC LASER PARA CORTE E GRAVAÇÃO**

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: 26/10/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Leonardo Rodrigues Limongi (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho a Deus, a meus pais, amigos de curso, funcionários do RU e da Universidade.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, o criador, que concede toda boa dádiva, a meus pais, que me deram um apoio indispensável nessa jornada, ao corpo docente, nominalmente, aos professores Marcio, meu orientador, e Fabrício, que muito me aconselhou, aos amigos de república: Carlos, Anderson, Lucas, Claudio e demais, aos amigos dos IBs e de curso: Marcos, Herenilton, Débora, Alison, Gabrieli, Karina, Samir e demais, e a todos os companheiros de curso que suportaram minhas interrupções e questionamentos.

O temor do Senhor é o princípio da sabedoria. (SALOMÃO, 900AC)

## RESUMO

Este trabalho consiste no projeto e construção de uma máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado) para gravação e corte a LASER como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação e para apoiar trabalhos de pesquisa e desenvolvimento em andamento no laboratório de robótica do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Durante o desenvolvimento do projeto foram estudados detalhadamente os sistemas mecânicos que compõem uma máquina CNC cartesiana de dois eixos. Os componentes foram selecionados visando atender às características da estrutura mecânica e aos requisitos de precisão e acurácia do trabalho a ser realizado. Os dispositivos selecionados são comuns no mercado, apresentam bastante flexibilidade de operação e baixo custo.

**Palavras-chave:** CNC; GRBL; LASER; Corte; Gravação.

## **ABSTRACT**

This undergraduate thesis consists in the ideation and construction of a CNC (Computer Numerical Control) machine for LASER engraving and cutting as part of the requirements for obtaining the Bachelor's degree in Control and Automation Engineering and to support ongoing research and various projects work in the Robotics Laboratory at the Department of Electrical Engineering (DEE) at the Federal University of Pernambuco (UFPE). During the development of this project, the mechanical systems that make up a two-axis cartesian CNC machine were studied in detail. The components were selected to match with the mechanical structure characteristics and with the required precision and accuracy of the work to be performed. The selected devices are common in the market, have a lot of operation flexibility and low cost.

**Keywords:** CNC, GRBL, LASER, Cutting, Engraving.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do projeto.....	14
Figura 2 - Máquina CNC cartesiana.....	18
Figura 3 - Máquina CNC em delta.....	19
Figura 4 - Máquina CNC antropomórfica.....	19
Figura 5 - Máquina cartesiana CNC com pórtico móvel.....	20
Figura 6 - Máquina CNC com pórtico móvel de porte industrial.....	20
Figura 7 - Máquina CNC com mesa móvel em dois eixos.....	21
Figura 8 - Fuso trapezoidal de inox com castanha de bronze.....	22
Figura 9 - Castanha com sistema anti folga.....	23
Figura 10 - Fuso de esferas circulante.....	24
Figura 11 - Conjunto pião e cremalheira.....	25
Figura 12 - Polia e correia dentadas.....	25
Figura 13 - Guia linear e rolamentos abertos e fechados.....	27
Figura 14 – Guia linear tipo trilho com patins.....	28
Figura 15 - Guia linear de esferas.....	28
Figura 16 - Motor de passo NEMA 23.....	30
Figura 17 - Servo motores e seus drivers.....	31
Figura 18 - Oblação a LASER.....	33
Figura 19 - Perfil de emissão de um LASER de diodo.....	34
Figura 20 - ESP32-DevKitC V4 com módulo ESP32-WROOM-32 soldado.....	36
Figura 21 - Diferentes porcentagens de ciclo de trabalho para um sinal PWM.....	37
Figura 22 - Drivers A4988 e DRV8825 respectivamente.....	38
Figura 23 - A4988 pinout.....	38
Figura 24 - Acionamento de motor de passo conectado através de uma <i>protoboard</i> .....	40
Figura 25 - Arduino Uno CNC Shield V4.....	40
Figura 26 - CNC Shield TMC2209 Pen Laser V2.0.....	41
Figura 27 – Frente da máquina CNC a LASER desse projeto.....	46
Figura 28 - Traseira da máquina desse projeto.....	46
Figura 29 - Lateral da máquina desse projeto.....	47
Figura 30 - Motor de passo KP35FM2-032.....	47

Figura 31 - Chaves fim de curso mecânicas .....	49
Figura 32 - Chave fim de curso .....	50
Figura 33 - LASER LD3070LA 5.5W -.....	51
Figura 34 - Plataforma de controle desenvolvida .....	53
Figura 35 - Pin-out do ESP32 DEV KIT C versão 1 .....	54
Figura 36 - Página de configuração do GRBL no WebUi .....	57
Figura 37 - Página de configuração de conexões Wi-Fi e Bluetooth no WebUi. ....	58
Figura 38 - Cabeamento torcido e blindado contra ruídos eletromagnéticos .....	62
Figura 39 - Filtro passivo RC.....	63
Figura 40 - Gravura a LASER em modo M3. Nota-se queimaduras mais severas onde a máquina se move mais lentamente .....	65
Figura 41 - Janela inicial do LaserGRBL com uma imagem carregada e comandos recém executados. ....	66
Figura 42 - Máquina CNC LASER durante gravação .....	68
Figura 43 - Configurações para corte ou gravação no LaserGRBL.....	69
Figura 44 - Gravura de contorno de um retrato em papelão .....	70
Figura 45 - Gravuras em papel madeira com potência constante e dinâmica.....	71
Figura 46 - Características do modo de potência dinâmica .....	72
Figura 47 - Gravura de contorno de desenho simples em papel madeira .....	72
Figura 48 - Gravação em emborrachado .....	73
Figura 49 - Projeto Eletrônico da Placa de Controle desse trabalho .....	78
Figura 50 – Projeto Eletrônico Comentado .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comandos utilizados no código G.....	42
Tabela 2 - Dados para o motor de passo KP35FM2-032 .....	48
Tabela 3 - Dados do LASER LD3070LA 5.5W .....	51
Tabela 4 - Configurações de micro passo do driver A4988.....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D.....	Três Dimensões
CAM .....	Computer Aided Manufacturing
CNC .....	Computer Numerical Control
DEE .....	Departamento de Engenharia Elétrica
LASER .....	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
PWM .....	Pulse Width Modulation
PCB.....	Printed Circuit Board
PCI .....	Placa de Circuito Impresso
SoC .....	Sistem On Chip
UFPE.....	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	<b>Geral</b> .....	<b>16</b>
1.1.2	<b>Específicos</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
2.1	DEFINIÇÃO .....	18
2.2	ESTRUTURA MECÂNICA.....	18
2.2.1	<b>Modelos Estruturais</b> .....	<b>18</b>
2.2.2	<b>Sistemas de Transmissão</b> .....	<b>21</b>
2.2.3	<b>Sistemas de Guia</b> .....	<b>26</b>
2.2.4	<b>Motores</b> .....	<b>29</b>
2.2.5	<b>LASERs</b> .....	<b>31</b>
2.3	ELETRÔNICA.....	35
2.3.1	<b>Microcontroladores</b> .....	<b>35</b>
2.3.2	<b>PWM</b> .....	<b>36</b>
2.3.3	<b>DRIVERS para Motores de Passo</b> .....	<b>37</b>
2.3.4	<b>CNC Shield</b> .....	<b>39</b>
2.3.5	<b>Código G</b> .....	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO</b> .....	<b>45</b>
3.1	ESTRUTURA MECÂNICA.....	45
3.2	ATUADOR LASER .....	50
3.3	PLATAFORMA DE CONTROLE.....	52
3.4	CONFIGURAÇÃO DOS DRIVERS A4988 .....	54
3.5	GRBL ESP32.....	56
3.5.1	<b>Considerações Gerais</b> .....	<b>56</b>
3.5.2	<b>Configurações de Operação do GRBL</b> .....	<b>60</b>
3.5.3	<b>Modo LASER</b> .....	<b>64</b>

3.6	G-CODE SENDER .....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>

# 1 INTRODUÇÃO

- **Delimitação do Tema**

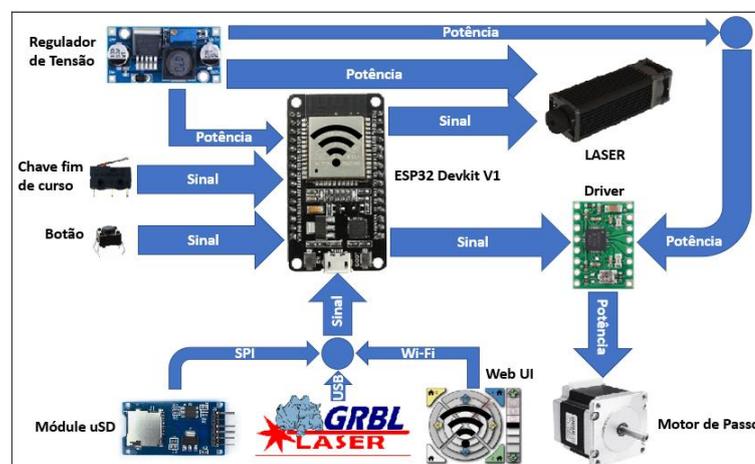
Dentre os diversos equipamentos que utilizam CNC, entre eles: impressoras 3D, máquinas de corte a LASER, corte a plasma, máquinas de desenho e pintura, furadeiras automáticas, entre outros, o tema de controles numéricos computadorizados é delimitado neste trabalho ao uso do kit de desenvolvimento Dev kit C v1 ESP32 para controle de máquina CNC LASER cartesiana de dois eixos para corte e gravação.

Na gama de *softwares* existentes para o controle de comandos numéricos, o presente projeto delimita esse universo à utilização de softwares gratuitos, nominalmente, LaserGRBL como ferramenta CAM, e o GRBL para ESP32 como *software* de controle, que não se limitam a trabalhar com fabricantes ou famílias específicas para cada componente.

O projeto em sua estrutura é dimensionado para cortar, ou gravar, madeira, emborrachado, couro, diversos tipos de papel e outros materiais especificados pelo fabricante do atuador LASER, em superfícies de até 260 x 200mm.

A Figura 1 mostra o esquema básico das relações dos componentes e seus nomes.

Figura 1 - Esquema do projeto.



Fonte: Autor.

- **Histórico e Problemática**

Depois da segunda guerra mundial, as primeiras máquinas de usinagem CNC foram construídas. Inicialmente não foram necessários grandes investimentos, já que as máquinas CNC eram adaptações de máquinas de usinagem já existentes (CHOUDHARY, 2017).

A grande vantagem de se trabalhar com uma máquina CNC, é o seu potencial de produção em massa, e isso pode ser demonstrado com a criação de inúmeras peças em uma mesma demanda (SILVA e MARCUS, 2022). Os controles CNC são capazes de controlar os eixos X, Y e Z, simultaneamente, permitindo o tempo de produção menor, a repetibilidade da máquina ser maior e os projetos mais complexos serem executados com maior perfeição cuja tecnologia foi barateada pela utilização de microprocessadores a partir do ano 2000, possibilitando aos mesmos serem utilizados além dos meios industriais, também por hobbystas e microempresas (FERNANDES, CASTANHO e GOMES, 2017). A primeira máquina de corte LASER usada para produção foi desenvolvida em 1965. Esta máquina, fabricada pelo *Western Electric Engineering Research Center*, foi usada para fazer furos em matrizes diamantadas. Dois anos depois, começou o uso do corte a jato de oxigênio assistido por LASER em metais. A aplicação do corte a LASER continua a crescer e se ampliar. Mesmo em aplicações aeroespaciais, esta tecnologia tornou-se muito útil no corte de titânio para estruturas de aeronaves. Desde então, a pesquisa sobre esta tecnologia criou uma variedade de inovações no desenvolvimento de diferentes tipos de LASER especializado. Algumas dessas otimizações incluem potência média máxima de saída, eficiência e minimização do custo. Essa otimização pode ser alcançada controlando a quantidade de energia LASER entregue à carga (RENANN G. BALDOVINO, 2013). Atualmente, máquinas CNC têm várias aplicações, entre elas estão o torneamento, fresamento, ou corte, gravação e perfuração.

Seja no mundo acadêmico, em empresas de desenvolvimento, ou para hobbistas, a construção de protótipos apresenta grandes obstáculos: a falta de qualificação técnica e de máquinas operatrizes para a elaboração dos protótipos, estão muito presentes nos departamentos de desenvolvimento. O custo de fabricação é outro fator que dificulta a confecção dos primeiros protótipos, até porque, muitos

projetos passam por diversas modificações até chegarem em sua versão final (SILVA, 2018).

- **Justificativa**

O DEE da UFPE seria bastante beneficiado por ter uma máquina CNC a LASER, pois seria possível, então, a realização de cortes e gravação de determinados materiais para apoiar pesquisas e desenvolvimento de projetos atuais e futuros, além de proporcionar a oportunidade de uma experiência prática e de análise para estudantes em disciplinas, como por exemplo, Robótica Industrial, não estando, porém, seu uso limitado à graduação.

No tempo da escrita desse trabalho, havia uma máquina desse tipo no Laboratório de Robótica e Automação Residencial que, no entanto, não estava funcionando mais. Decidiu-se, então, pela atualização da mesma, com o máximo de reaproveitamento possível, o que dispensa o projeto mecânico através de ferramentas CAD, como o ScketchUp.

Desta forma, poder-se-á tornar o ensino mais prático, palpável e assimilável, além de tornar possível o emprego de gravuras, desenhos e cortes para apoiar pesquisas e desenvolvimento de projetos no DEE.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Projetar e construir uma máquina CNC LASER cartesiana de dois eixos para corte e gravação.

### **1.1.2 Específicos**

- Revisão da estrutura mecânica de uma máquina desativada;
- Desenho da placa de controle eletrônico;

- Construção e teste da placa de controle;
- Calibração do software;
- Teste integral da máquina e validação do trabalho a partir dos resultados;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Definição

CNC é um sistema de controle baseado em microprocessador que aceita um conjunto de instruções de programa, ou códigos de máquina (código G), processa e envia valores de dados de controle de saída para uma máquina, e recebe e analisa a informação de retorno dos seus sensores para se certificar da operação adequada da máquina em termo de movimento e velocidade de processamento (RENANN G. BALDOVINO, 2013).

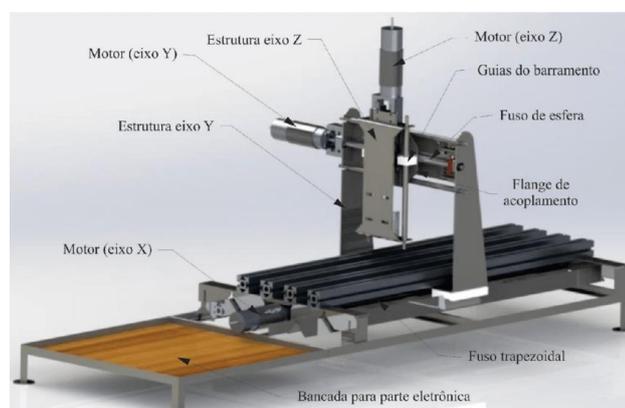
Esta máquina deve ser capaz de executar tarefas controladas por computador e pode possuir vários tipos e modelos de estruturas diferentes (SILVA, 2018).

### 2.2 Estrutura Mecânica

#### 2.2.1 Modelos Estruturais

Os tipos mais conhecidos são as máquinas cartesianas, em delta e antropomorfos. (SILVA, 2018) Estes modelos podem ser vistos nas Figura 2, Figura 3 e Figura 4, respectivamente abaixo.

Figura 2 - Máquina CNC cartesiana



Fonte: (SINCAK, DILDA e LERMEN, 2016)

Figura 3 - Máquina CNC em delta



Fonte: (SILVA, 2018)

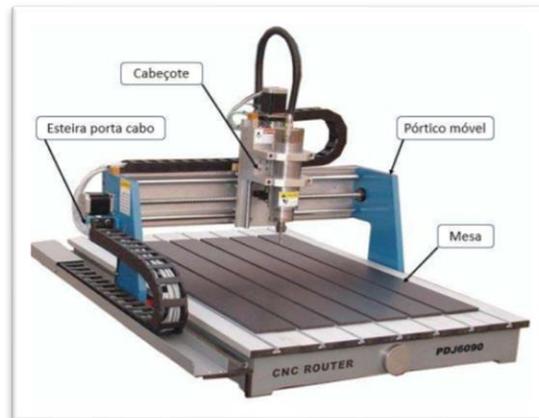
Figura 4 - Máquina CNC antropomórfica



Fonte: (KUKA, 2022)

A estrutura de uma máquina CNC cartesiana é projetada para que o cabeçote se mova nos três eixos cartesianos, assim como as máquinas manuais de fresagem. Porém existem diversos modelos estruturais que atendem a este tipo de requisito. Na Figura 5 são apresentados os elementos que compõem a estrutura mecânica da máquina cartesiana. Os modelos comuns são a mesa móvel e o pórtico móvel (SILVA, 2018).

Figura 5 - Máquina cartesiana CNC com pórtico móvel.



Fonte: (SILVA, 2018)

- **Pórtico Móvel**

Nas máquinas de pórtico móvel o atuador (ferramenta de corte, LASER, dosadora) se desloca na superfície da mesa. Este modelo não precisa de um espaço de acomodação maior do que sua estrutura, ocupando menos espaço do que as máquinas de mesa móvel. Estruturalmente, as máquinas de pórtico móvel são menos robustas, sendo possível apenas usinagem de materiais de baixa dureza em máquinas fresadoras (SILVA, 2018).

A Figura 6 ilustra uma máquina com pórtico móvel de porte industrial. Uma grande área de trabalho como a dela não é viável para máquinas de mesa móvel, pois demandaria uma área de acomodação muito grande (SILVA, 2018).

Figura 6 - Máquina CNC com pórtico móvel de porte industrial

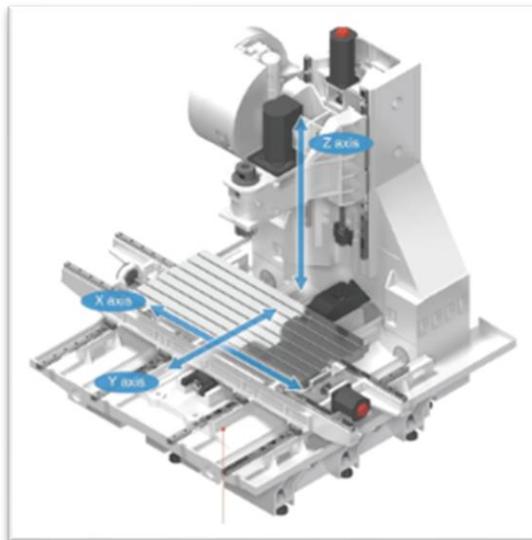


Fonte: (QUARKS, 2022)

- **Mesa móvel**

As máquinas fresadoras de mesa móvel foram largamente usadas na indústria por apresentarem características estruturais robustas. Máquinas com mesa móvel ocupam mais espaço em relação às máquinas com pórtico móvel, pois deve haver um espaço com o dobro da área da mesa para que a ferramenta possa se deslocar por toda extensão, porém este tipo de configuração proporciona uma maior facilidade de construção, além de uma maior resistência estrutural. (SILVA, 2018) Na Figura 7 pode-se observar uma máquina de mesa móvel.

Figura 7 - Máquina CNC com mesa móvel em dois eixos



Fonte: (PMACH, 2022)

### **2.2.2 Sistemas de Transmissão**

- **Fuso trapezoidal e castanha**

O sistema de transmissão com fuso com perfil de rosca trapezoidal e castanha é o mais comum entre máquinas de usinagem. (OVERBY, 2011)

O fuso é fixado em suas extremidades na estrutura da máquina. A castanha, por sua vez, é rosqueada no fuso e fixada na parte móvel da máquina (SILVA, 2018), conforme Figura 8.

O fuso é comumente fixado de três maneiras diferentes, sendo elas: mancal com rolamento radial, mancal com rolamento cônico ou mancal de deslizamento, sendo a mais comum a fixação com mancais com rolamento radial (OVERBY, 2011).

As castanhas apresentam uma folga em relação ao fuso, que ao mudar de direção, perde um pouco do deslocamento linear em relação ao movimento de rotação, causando assim, erro sistêmico na fabricação das peças (SILVA, 2018).

Alguns tipos de castanhas apresentam sistema anti folga, como pode ser visto na Figura 9. Esse sistema minimiza as folgas entre o conjunto, evitando erros na inversão de sentido. Esse sistema também requer um cuidado adicional com sua manutenção, pois o contato entre a castanha e o fuso gera um grande atrito, sendo necessário uma boa lubrificação desse conjunto (SILVA, 2018).

As castanhas geralmente são produzidas em material menos resistente que o fuso, para direcionar o desgaste para elas, sendo assim, quando as folgas estiverem fora da tolerância admitida, apenas a castanha precisa ser trocada (OVERBY, 2011).

Figura 8 - Fuso trapezoidal de inox com castanha de bronze



Fonte: (Marino Store, 2022)

Figura 9 - Castanha com sistema anti folga



Fonte: (AutoCore, 2022)

- **Fuso de esferas circulantes**

O fuso de esferas é responsável pela conversão de energia de rotação em movimentação linear (OVERBY, 2011).

As esferas metálicas são guiadas e realimentadas por canais de recirculação na castanha, dando linearidade e suavidade ao movimento (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

O fuso de esfera circulante tem várias vantagens comparado a o fuso trapezoidal, que são elas: 90 a 95 % de eficiência contra de 30 a 40% em fusos comuns, baixo torque de partida, evitando trancos no movimento, folga baixíssima, baixa manutenção e vida útil previsível (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

A grande desvantagem do fuso de esfera em relação ao fuso trapezoidal é o seu custo de aquisição elevado, que dependendo da precisão e atividade que será exercida pela máquina, torna-se mais viável utilizar fuso trapezoidal ou outros sistemas de transmissão (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

A Figura 10 mostra um fuso esfera com sua castanha em corte, possibilitando a visualização das partes que compõem esse sistema e tornando visível o sistema de recirculação (SILVA, 2018).

Figura 10 - Fuso de esferas circulante



Fonte: (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022)

- **Cremalheira e pião**

O uso de cremalheira e pião é geralmente o mais popular método de translação mecânica quando é necessário percorrer grandes distâncias (OVERBY, 2011).

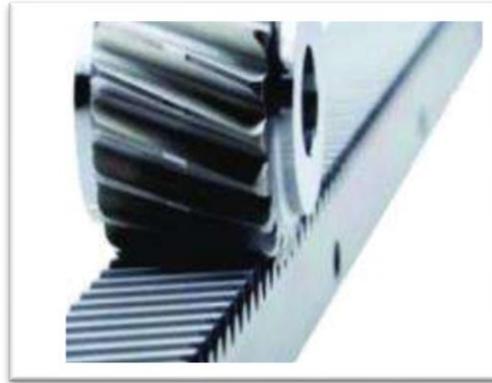
Esse sistema é composto por dois elementos, ou melhor, duas engrenagens de mesmo passo e módulo. A cremalheira é uma barra dentada plana. O pião é uma engrenagem comum que pode ter dentes helicoidais ou retos (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

Existem dois métodos de combinar esse sistema. O mais comum desses métodos é o que a cremalheira fica fixa na estrutura da máquina e o pião se movimenta junto com a porção móvel da estrutura. O segundo método é o que o pião fica fixo e a cremalheira se desloca com a parte móvel da estrutura (SILVA, 2018).

A grande vantagem do sistema pião/cremalheira é o seu custo de aquisição que é bastante acessível (OVERBY, 2011).

Na Figura 11 pode-se observar a uma cremalheira e uma engrenagem dos dentes helicoidais, essa combinação minimiza a existência de folgas entre o conjunto, minimizando tranco na reversão do movimento (SILVA, 2018).

Figura 11 - Conjunto pião e cremalheira



Fonte: (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022)

- **Polia e Correia**

Polias são elementos mecânicos circulares que são acoplados a eixos motores e movidos por máquinas e equipamentos. Para funcionar, as polias necessitam da presença de vínculos chamados correias. O conjunto é capaz de transferir movimento e força de uma parte para a outra da máquina. Os materiais empregados na fabricação de correias são os seguintes: borracha; couro; materiais fibrosos e sintéticos à base de algodão, viscose, perlon, náilon e materiais combinados à base de couro e sintéticos (Polias e Correias 1, 2022).

Existem diversos modelos de correias e polias, como as correias dentadas, correias em V, polias fixas e dentadas.

Figura 12 - Polia e correia dentadas



Fonte: (Polia e Correia, 2022)

### **2.2.3 Sistemas de Guia**

Independente do sistema de guias adotado por um projeto, suas principais funções são: garantir o movimento retilíneo aos eixos da máquina, tornar o movimento suave minimizando atritos, tornar a movimentação ortogonal entre os eixos e tornar a estrutura rígida e sem folga (OVERBY, 2011).

- **Guia Linear Eixo**

Esse sistema usa um trilho circular, também chamado de haste, como guia para um, ou mais, blocos deslizantes, que por sua vez, são compostos por um elemento de fixação e um rolamento linear. A Figura 13 mostra os tipos diversos de rolamentos lineares e a haste do sistema. Existem duas configurações de montagem para guia linear, que são elas: fim-montado e contínuo-montado. Esses tipos de montagem têm que ser previamente definidos pois, dependendo da escolha, o tipo de bloco de rolamento será diferente (SILVA, 2018).

No guia linear tipo fim-montado apenas as extremidades da haste são fixadas na estrutura da máquina, ficando toda a superfície disponível para o deslizamento do bloco. Nesta configuração, são usados blocos de rolamento fechado, e geralmente em pares de blocos rigidamente fixados para diminuir a deflexão da haste. Na configuração contínuo-montado a haste tem furos espaçados ao longo de sua extensão, que serão utilizados para fixá-la na estrutura da máquina, nessas condições a haste não terá toda sua superfície disponível para o bloco de rolamento, sendo necessário usar blocos de rolamento aberto (OVERBY, 2011).

Figura 13 - Guia linear e rolamentos abertos e fechados



Fonte: (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022)

- **Guia Linear Trilho**

Esta é uma das escolhas mais populares entre a maioria dos fabricantes, principalmente quando a máquina é projetada para aguentar grandes cargas e quando se quer uma boa precisão. (OVERBY, 2011) As Figura 14 e Figura 15 mostram dois modelos de guia linear.

Esse sistema tem inúmeras vantagens, sendo algumas delas:

- Precisão de posicionamento;
- Alta repetibilidade;
- Baixo atrito entre as partes deslizantes;
- Suporta altas velocidades de operação (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022).

A grande desvantagem desse sistema está no valor de aquisição, que apesar das inúmeras vantagens, citadas anteriormente, em relação aos outros modelos, seu custo, muitas vezes, o torna inviável ao projeto (SILVA, 2018).

Figura 14 – Guia linear tipo trilho com patins



Fonte: (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022)

- **Guia Linear de Esferas**

Apresenta princípio de funcionamento baseado em rolamento de esferas. Os contatos são pontuais, proporcionando diversas vantagens como pouco atrito, suavidade na movimentação e trabalho em alta velocidade (MECTROL, 2022).

Tem custo-benefício considerado excelente, já que seu preço é, geralmente, baixo e consegue combinar alta performance com durabilidade (ROSA BRASIL, 2022).

Figura 15 - Guia linear de esferas



Fonte: (ROLLON, 2022)

## 2.2.4 Motores

- **MOTOR DE PASSO**

Atualmente a maior parte das máquinas CNC que estão disponíveis no mercado utilizam motores de passo. Esse tipo de motor tem muitos polos magnéticos em seu estator, isso permite que o rotor se mova em pequenos incrementos na sua posição angular. Os motores de passo estão disponíveis em vários tamanhos diferentes, que são padronizados pela associação nacional de fabricantes elétricos (NEMA). Os motores comumente utilizados em máquinas CNC são: NEMA 17, NEMA 23, NEMA 34 e NEMA 42. A Figura 16 apresenta um motor NEMA 23 (OVERBY, 2011).

Um motor de passo pode ter quatro, cinco, seis ou oito fios, dependendo do tipo de construção dos enrolamentos do motor. Os motores com quatro fios são denominados bipolares. No caso de motores a oito fios, se pode escolher entre as configurações série ou paralelo. Motores de passo bipolares necessitam de mudança de polaridade da tensão nas suas bobinas para que haja mudança de sentido da corrente (SILVA, 2018) (Fernando K tecnologia, 2022).

Motores de passo unipolar possuem derivação central em suas bobinas. Para que a corrente tenha seu sentido alterado sem que o dispositivo que o aciona tenha que mudar a polaridade nos terminais da bobina, geralmente, o terminal positivo fica na derivação central e o sinal negativo é chaveado nos extremos da bobina (OVERBY, 2011) (Fernando K tecnologia, 2022).

Figura 16 - Motor de passo NEMA 23



Fonte: (BAÚ DA ELETRÔNICA, 2022)

- **Servo Motor**

Servo motores e motores de passo podem ser semelhantes fisicamente quando visto de fora, mas os estatores dessas máquinas diferem muito quando visto por dentro (OVERBY, 2011).

Servo motores, em comparação a motores de passo, tem menor número de polos em seu enrolamento. Além disso, servo motores fazem uso de sensores que retornam o posicionamento angular do rotor, caracterizando um sistema em malha fechada. Esse tipo de motor também tem rotor menor, logo sua massa é reduzida, tornando possível alcançar maior aceleração e velocidade. Quando se vai escolher um servo motor, tem-se duas opções, um motor de corrente contínua ou um motor de corrente alternada. Motores de corrente contínua tem um custo reduzido, mas usam escovas, que se desgastam rapidamente, tornando a manutenção mais frequente. Motores de corrente alternada, por outro lado, não possuem escovas, logo o cuidado com a sua manutenção é bem menor que em motores de corrente contínua (SILVA, 2018).

Estes dois tipos de motores, para o seu acionamento, necessitam de drivers que exercem o controle em malha fechada e se ajustam às características intrínsecas dos motores. Na Figura 17 estão dois servomotores e seus drivers (OVERBY, 2011).

Figura 17 - Servo motores e seus drivers



Fonte: (KALATEC AUTOMAÇÃO, 2022)

### **2.2.5 LASERS**

A geração de um feixe LASER envolve o estímulo de um material através de descargas elétricas em um recipiente fechado. Então, o feixe é refletido internamente em espelhos, ou por fibra ótica. Estes espelhos são usados para direcionar o caminho da luz coerente a uma lente de foco no material alvo (RENANN G. BALDOVINO, 2013).

A tecnologia LASER têm três aplicações principais: corte, gravação e soldagem.

- **Gravação**

A gravação a LASER é usada principalmente para propósitos decorativos. A indústria automotiva está adotando uma grande variedade de soluções técnicas de gravação a LASER para aplicações decorativas (ANTONIN BOULAND, 2019).

- **Corte**

Corte a LASER controlado numericamente por computador (CNC) é uma tecnologia industrial que usa um LASER para cortar materiais ferrosos e não ferrosos. Funciona direcionando um feixe de luz de alta potência, por meio de um computador controlador, em um material, ou peça a ser cortada. (RENANN G. BALDOVINO, 2013)

A eficiência de um LASER industrial pode variar de 5 a 45%. Alto consumo de potência é uma grande desvantagem do corte a LASER, porém há vários estudos que provam que o uso de LASER resulta em um desempenho excelente em comparação com outros sistemas CNC em termos de acurácia e precisão (RENANN G. BALDOVINO, 2013).

O corte de materiais por LASER é essencialmente um processo termoquímico em que o material é removido através de alterações químicas e de fase.

- **Soldagem**

É um processo de soldagem por feixe que é usado para unir metais ou termoplásticos. Uma concentração imensamente alta de energia é focada, o que, por sua vez, faz com que o ponto de conexão abaixo derreta e a junta possa ser criada. Devido à concentração de energia aplicada, a solda esfria muito rapidamente. Como resultado, a distorção térmica é baixa e uma solda estreita é criada. Isso significa que as peças são unidas e ajustadas com precisão, e quase não é necessário retrabalhos. A soldagem a laser pode ser usada para criar quase todos os tipos de juntas, por exemplo soldas de topo, preenchimento e sobrepostas. Também pode ser usada a distância e em peças de difícil acesso. Se as larguras dos intervalos forem um pouco maiores, os aditivos de soldagem devem ser usados no material (ABICOR BINZEL, 2022).

Há outras aplicações surgindo, entre elas está, por exemplo, a limpeza a LASER.

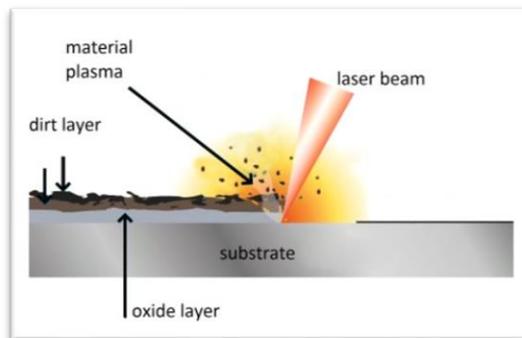
- **Limpeza**

Limpeza a LASER é um processo que não poluente usado para remover ferrugem, tinta, óxidos e outros contaminantes da superfície de metais. Por causa de

sua eficiência, está sendo usada em cada vez mais aplicações. Limpeza a LASER requer um LASER de fibra pulsado (tipicamente 50 watts ou mais) (LASERAX, 2022).

Quando o feixe LASER toca a superfície enferrujada do aço, ligações moleculares na sujeira, ou ferrugem, são quebradas o material é ejetado do substrato. Aparentemente, o material é vaporizado pelo LASER (LASERAX, 2022).

Figura 18 - Oblação a LASER



Fonte: (LASERAX, 2022)

Os tipos de LASER podem ser categorizados de acordo com o material gerador: sólido, gasoso, líquido ou semicondutor.

- **Gasoso**

O LASER de CO<sub>2</sub> é normalmente usado em corte industrial de aço macio e inoxidável, alumínio, titânio e materiais não ferrosos (RENANN G. BALDOVINO, 2013).

Hélio (He) e Hélio-Neônio (HeNe) são os LASERs a gás mais comuns e emitem luz vermelha visível.

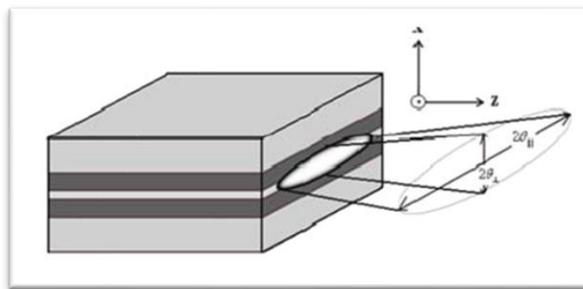
- **Sólido**

LASERs de estado sólido possuem material de geração distribuído em uma matriz sólida (como o LASER de rubi, ou o LASER Yag de neodímio:ítrio-alumínio-granada).

- **Semicondutor**

LASERs semicondutores, também chamados de LASERs de diodo. Esses dispositivos eletrônicos costumam ser muito pequenos e utilizam baixa energia. Mas, em geral LASERs de semicondutor emitem radiação com um perfil elíptico com um ângulo de divergência horizontal e vertical diferentes. Esta diferença é conhecida como estigmatismo e é um parâmetro indesejado (LIN PRASETYANI, 2022).

Figura 19 - Perfil de emissão de um LASER de diodo



Fonte: (LIN PRASETYANI, 2022)

A radiação emitida pelo LASER pode ser visível, ultravioleta ou infravermelha.

O feixe LASER é uma fonte de luz muito intensa e pode causar danos severos, especialmente em contato com os olhos. As máquinas a LASER também contêm componentes de alta tensão que podem causar choques fatais. Além disso, durante o corte, há emissões de gases e fumos particulados que podem ser prejudiciais à saúde, por isso seu uso e manutenção devem ser efetuados com máximo cuidado e só por pessoas devidamente treinadas, ou habilitadas.

## 2.3 Eletrônica

### 2.3.1 *Microcontroladores*

O termo microcomputador é usado para descrever sistemas que incluem no mínimo um microprocessador, memória de programa, memória de dados e dispositivo de entrada e saída. Alguns microcomputadores incluem componentes adicionais, tais como: temporizadores, contadores e conversores analógico para digital (IBRAHIM, 2008).

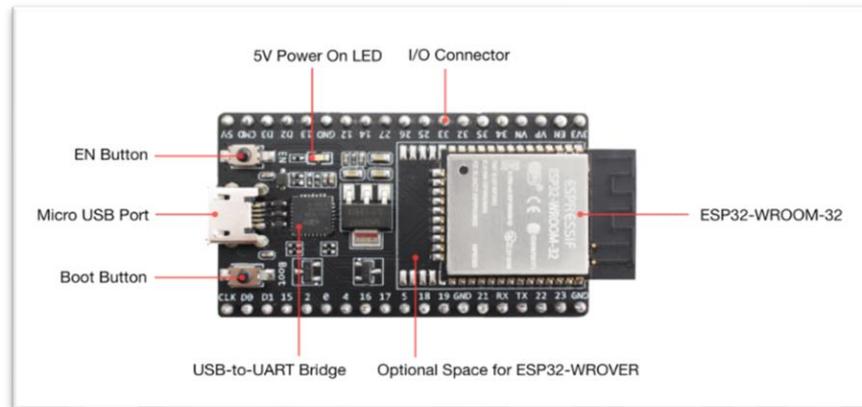
Microcontroladores são microcomputadores em um único chip. Todos os microcontroladores operam de forma que o usuário escreve em campos de memórias que são chamados de registradores, habilitando as funções desejadas, e todas estas informações a respeito dos registradores estão contidas na folha de dados do microcontrolador (SILVA, 2018).

Os microcontroladores podem ser programados em linguagem assembly ou em linguagem de programação de alto nível. Em assembly, a programação fica mais eficiente, porém demanda mais tempo de trabalho. Esta linguagem é composta por mnemônicos que podem variar de acordo com o chip usado, dificultando a programação (SILVA, 2018).

Em linguagem de alto nível a programação é bem mais simples e depende do software usado para programar. Há várias bibliotecas pré-definidas que tornam a programação mais rápida, porém a um custo de eficiência do programa, pois é necessário compilá-lo para depois gravá-lo no chip (IBRAHIM, 2008).

A Figura 20 mostra uma placa de desenvolvimento com microcontrolador embarcado.

Figura 20 - ESP32-DevKitC V4 com módulo ESP32-WROOM-32 soldado



Fonte: (ESPRESSIF, 2021)

O kit de desenvolvimento da Figura 20 contém uma interface USB para promover rápida iniciação e fácil acesso. Ele consiste em uma PCB que contém um invólucro metálico com um módulo ESP32 com pinos SMD e uma antena. Dentro desse módulo há um ESP32 System on Chip (SoC) e um chip FLASH SPI usado para armazenar o programa. SoC é o menor package, ou dispositivo, que contém uma CPU ESP32, controladores periféricos, um pouco de RAM e ROM e, às vezes, um pouco de memória FLASH (Grbl (CNC Controller) For ESP32, 2021).

Microcontroladores geralmente possuem várias portas, ou pinos, com a funcionalidade de Pulse-Width Modulation (PWM), uma ferramenta muito utilizada em sistemas de controle.

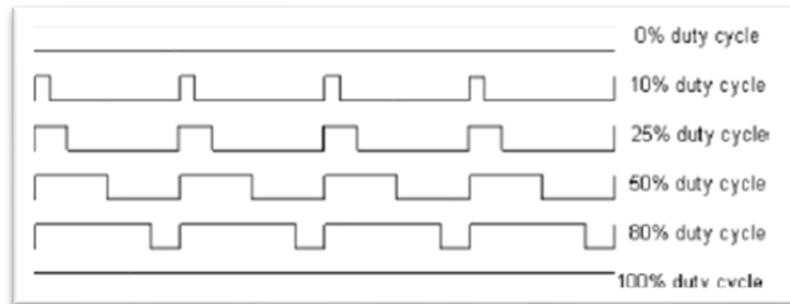
### 2.3.2 PWM

PWM é uma técnica de modulação usada para controlar a largura, ou duração, de pulso de tensão baseando-se no sinal de modulação. O PWM, que é digital por natureza, tem inerentemente imunidade a ruído, o que permite um sinal analógico ser enviado mesmo em uma linha de transmissão comprida (RENANN G. BALDOVINO, 2013).

*Duty Cycle*, ou ciclo de trabalho, é o valor, expresso em porcentagem, que descreve a proporção de tempo relativa a um intervalo regular, ou período, em que o

o sinal está ativado. A figura 17 mostra diferentes porcentagens de ciclo de trabalho para um determinado sinal (RENANN G. BALDOVINO, 2013).

Figura 21 - Diferentes porcentagens de ciclo de trabalho para um sinal PWM



Fonte: (RENANN G. BALDOVINO, 2013)

A potência do LASER, assim como a tensão de alimentação, é puramente analógica por natureza. Controle analógico é sensível a pequenas mudanças na resistência dos fios e ruído eletromagnético do ambiente. Muitos estudos mostram que PWM é menos sensível a distorção e ruído eletromagnético. Isto é especialmente importante em máquinas de alta precisão como sistemas CNC a LASER. PWM também é provavelmente econômico pois não requer módulos adicionais para conversão analógica e condicionamento de sinal (RENANN G. BALDOVINO, 2013).

### **2.3.3 DRIVERS para Motores de Passo**

Driver para motor de passo é um dispositivo interface de potência que fica entre o controlador e o motor. Na maioria das aplicações são usados drivers de micro passo, que aumentam a resolução dos motores, ou seja, um motor que produz 200 passos por rotação, com auxílio do driver, pode chegar a 2000 passos por rotação (OVERBY, 2011).

A maior parte dos drivers facilita muito o controle do motor, sendo necessário apenas um sinal digital para indicar direção e um trem de pulsos para indicar os passos para que o driver gere o incremento de rotação do motor (SILVA, 2018).

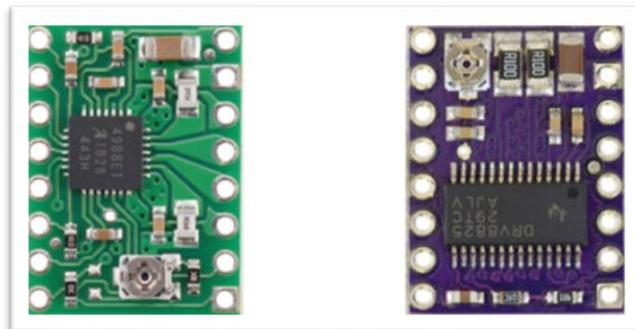
- **A4988 e DRV8835**

O *pinout* do driver DRV8825 (TEXAS INSTRUMENTS, 2022) é exatamente o mesmo que o do A4988 (ALLEGRO, 2022), por isso um pode substituir o outro. Porém seus valores nominais são um pouco diferentes, conforme datasheets.

A peça central do módulo A4988 é o chip feito pela Allegro MicroSystems: o driver de micropassos com proteção de sobrecorrente. Este driver de motor integrado faz interface com um microcontrolador se tornar fácil, tornando necessários apenas dois pinos para controlar tanto velocidade quanto a sentido do motor de passo.

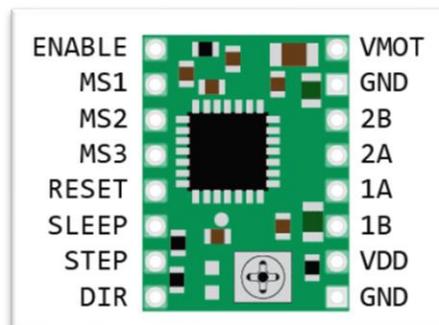
Esse driver tem  $35\text{ V} \pm 2\text{A}$  de máxima capacidade, suficiente para controlar motores de passo de médio porte como o motor bipolar NEMA 17 (MAKERGUIDES, 2022).

Figura 22 - Drivers A4988 e DRV8825 respectivamente



Fonte: (MAKERGUIDES, 2022)

Figura 23 - A4988 pinout



Fonte: (MAKERGUIDES, 2022)

**ENABLE** – Um sinal baixo ativa os drivers do motor.

**MS1, MS2 e MS3** – São entradas para selecionar o modo de sequência dos passos (passo completo, meio passo, um quarto de passo ou um oitavo de passo e um dezesseis avos de passo).

**RESET** – Um sinal baixo reinicia o *driver*, desativando as saídas e ignora pulsos na entrada. Este pino deve ser mantido com tensão de Vdd para que a placa funcione.

**SLEEP** – Sob tensão baixa, desabilita alguns circuitos internos para economia de energia.

**STEP** – um sinal com transição de baixo para alto avança um passo.

**DIR** – Permite alterar o sentido de rotação do motor entre horário e anti-horário.

**Vmot e GND** – Alimentação do motor em até 35V

**2B e 2A** – Ligar a outra bobina do motor.

**1B e 1A** – Ligar uma das bobinas do motor.

**Vdd** – Alimentação do circuito de controle lógico (3V ou 5.5V).

**GND** – Terra do circuito de controle (ALLEGRO, 2022).

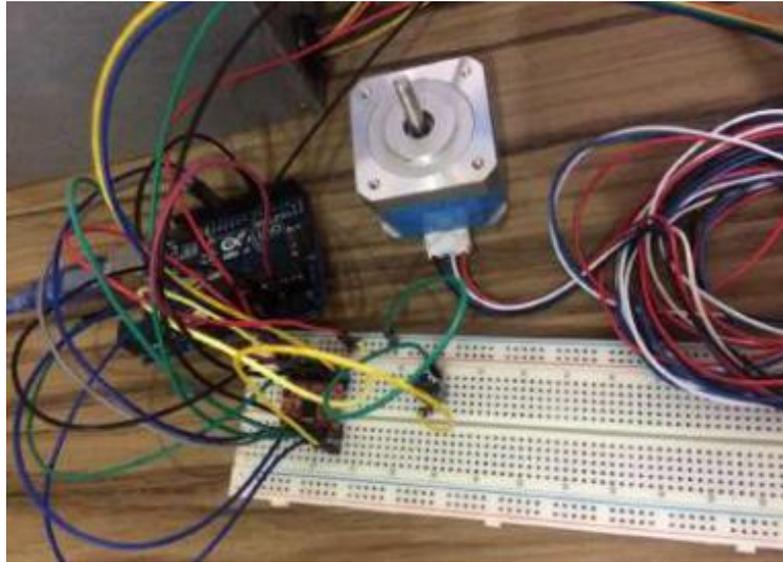
#### **2.3.4 CNC Shield**

*Shield* é um nome comumente dado a uma Placa de Circuito Impresso (PCI) feita para alojar controlador, drivers, circuitos condicionadores de sinal e de potência, e interfaces para sensores e atuadores.

Uma CNC *Shield* é um *Shield* pensada para atuar em projetos de máquinas CNC. Uma CNC *Shield* contém conectores de drivers de motor de passo, ou conexões para motores de passo externos, um regulador de tensão para diminuir o nível de tensão aplicada ao motor (normalmente entre 12-24V, para 5V) e vários conectores para coisas como chaves fim de curso, *spindle*, LASER, etc (Grbl (CNC Controller) For ESP32, 2021).

As conexões entre controlador, driver e motores requerem muitos fios, como pode ser visto na Figura 24, o que pode ser uma grande fonte de erros e de confusão, portanto, evitar esses problemas é a principal função do *Shield*.

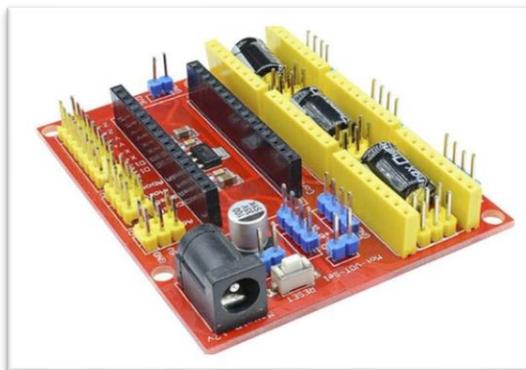
Figura 24 - Acionamento de motor de passo conectado através de uma *protoboard*



Fonte: (SILVA e MARCUS, 2022)

O Arduino CNC Shield V4, Figura 25, foi projetado com o intuito de simplificar as ligações dos motores de passo, tendo nela 4 soquetes necessários para cada driver e ligações das bobinas dos motores de passo. Esse componente suporta alimentação de 12V a 36V, observando o componente a ser ligado nela, pois existem diversos *drivers* no mercado, mas cada um necessita de diferente tensão (SILVA e MARCUS, 2022).

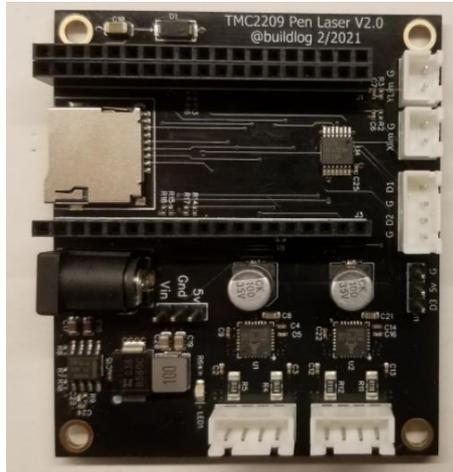
Figura 25 - Arduino Uno CNC Shield V4



Fonte: (fabricadebolso, 2021)

Há várias CNC *Shields* disponíveis no mercado, como o TMC2209 Pen/Laser Controller.

Figura 26 - CNC Shield TMC2209 Pen Laser V2.0



Fonte: (TMC2209\_Pen\_Laser, 2022)

Também pode-se optar por construir um shield personalizado. A fim de ser construída, uma PCB precisa ser primeiramente projetada. Há vários *softwares* que foram criados com essa finalidade.

O EAGLE, é um *software* para criação de placas de circuito impresso. Ele conta com uma grande quantidade de componente eletrônico e várias bibliotecas, possibilitando a criação de inúmeros circuitos. Ele possui, inclusive, um plugin para gerar código G a partir de um circuito (AUTODESK, 2022).

Proteus e KiCad são outros *softwares* com a mesma finalidade, muitas fontes online e amplamente conhecidos.

### **2.3.5 Código G**

Código G é uma linguagem de comando de máquina que controla movimentos geométricos discretos multidimensionais, além de algumas informações não geométricas a respeito do funcionamento da máquina (OVERBY, 2011).

O Código G não é como as linguagens de programação comuns que devem ser compiladas antes de usadas. No entanto, ela deve se adequar ao equipamento que será controlado. (SILVA, 2018) Na Tabela 1 observam-se os comandos do código G e suas funcionalidades.

Existem vários programas CAM nos quais o usuário pode construir um projeto tridimensional, mas o formato de arquivo gerado por esses softwares não pode ser lido diretamente pelo software da máquina CNC. Após a idealização, o projeto passa por outro *software* para ser gerado o seu código G (SILVA, 2018).

Tabela 1 - Comandos utilizados no código G

<b>Código G</b>	<b>Significado</b>
G0	Posicionamento Rápido
G1	Interpolação Linear
G2	Interpolação helicoidal / circular horária
G3	Interpolação helicoidal / circular anti-horária
G4	Dwell
G10	Definição da origem do sistema de coordenadas
G17	Seleção do plano XY
G18	Seleção do plano XZ
G19	Seleção do plano YZ
G20	Seleção do sistema de entrada em polegadas
G21	Seleção do sistema de entrada em milímetro
G28	Retorno para <i>Home</i>
G30	Retorno à casa secundária
G38.2	Sensor em linha reta
G40	Cancelar a compensação de raio de corte

<b>Código G</b>	<b>Significado</b>
G41	Ativar compensação de raio de corte à esquerda
G42	Ativar compensação de raio de corte à direita
G43	Compensar comprimento da ferramenta
G53	Movimento no sistema de coordenadas
G54	Uso do sistema de coordenadas de trabalho programada 1
G55	Uso do sistema de coordenadas de trabalho programada 2
G56	Uso do sistema de coordenadas de trabalho programada 3
G57	Uso do sistema de coordenadas de trabalho programada 4
G58	Uso do sistema de coordenadas de trabalho programada 5
G59	Uso do sistema de coordenadas de trabalho programada 6
G59.1	Uso do sistema de coordenadas de trabalho programada 7
G59.2	Uso do sistema de coordenadas de trabalho programada 8
G59.3	Uso do sistema de coordenadas de trabalho programada 9
G61	Modo de controle de trajetória: trajetória exata
G61.1	Modo de controle de trajetória: parada exata
G64	Modo de controle de trajetória: contínuo
G80	Cancelar modo de movimento (incluindo qualquer ciclo fixo)
G90	Modo de distância absoluto
G91	Modo de distância incremental
G93	Modo inverso de tempo do feed rate
G94	Modo de unidades por minuto para feed rate

Fonte: (THORNTON, 2022)

Plataformas de comunicação em código G geralmente são usadas de acordo com a natureza da máquina. Embora cada um desses softwares possa ser usado tanto para máquinas fresadoras, quanto para máquinas a LASER, geralmente são usados programas dedicados a uma dessas duas opções:

Para máquinas fresadoras:

- UGS
- Candle
- CNCJS
- GRBL-Plotter
- EstlCAM
- Source Rabbit Gcode Sender
- Chilipeppr

Para máquinas LASER:

- Lightburn
- LaserGRBL
- LaserWeb4

Entre outros.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

#### 3.1 Estrutura Mecânica

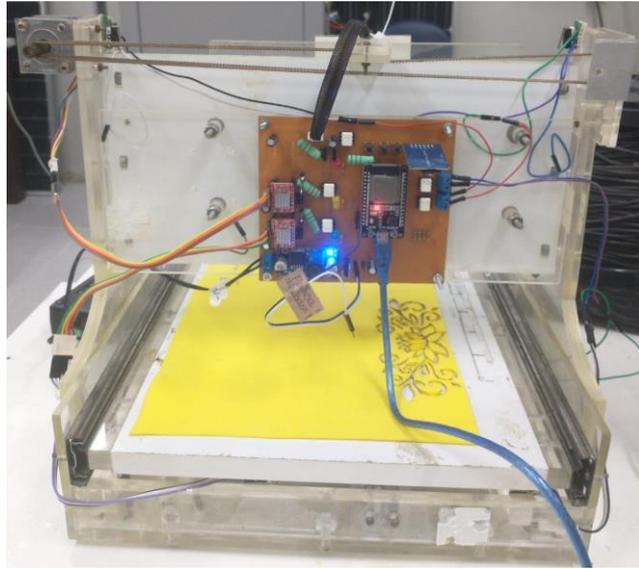
Para selecionar a máquina ideal, é importante definir quais as atividades que serão executadas pela máquina que será desenvolvida. As máquinas CNC estão integradas a vários setores de manufatura, sendo as atividades mais comuns: corte de materiais, impressão tridimensional, posicionamento preciso de objetos, usinagem, escaneamento tridimensional, corte a LASER, entre outros. Cada tipo de estrutura tem características intrínsecas, que podem melhorar os aspectos construtivos da máquina e a complexidade dos algoritmos de controle (SILVA, 2018).

Como em uma máquina a LASER não há chaveamento de tensão de alta frequência em um inversor, ou uso de *spindle*, as interferências eletromagnéticas no funcionamento dos circuitos digitais são de baixa intensidade, o que permite uma construção mecânica não aterrada. Além disso, uma máquina a LASER não exerce grandes esforços mecânicos, permitindo emprego de materiais mais leves, frágeis e baratos, como madeira e acrílico.

- **A máquina desse projeto**

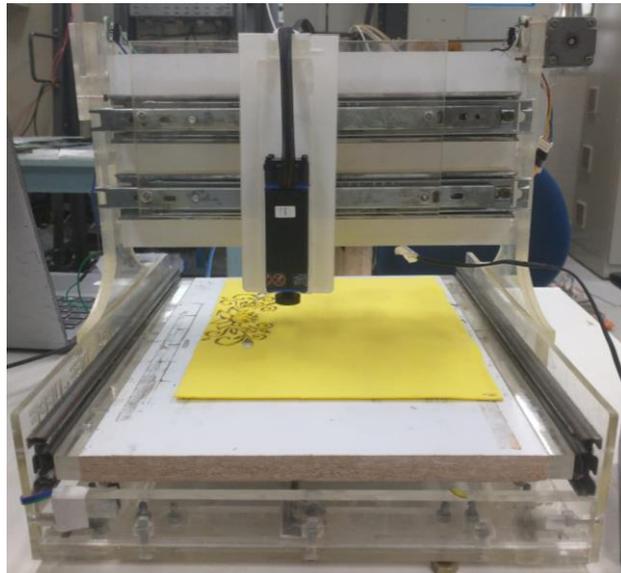
A máquina desse projeto, Figura 27 e Figura 28, é do tipo mesa móvel (Figura 7) com guias lineares com gaiola de esferas (Figura 15) e o sistema de transmissão é o de Polia e Corrêa dentadas (Figura 12).

Figura 27 – Frente da máquina CNC a LASER desse projeto



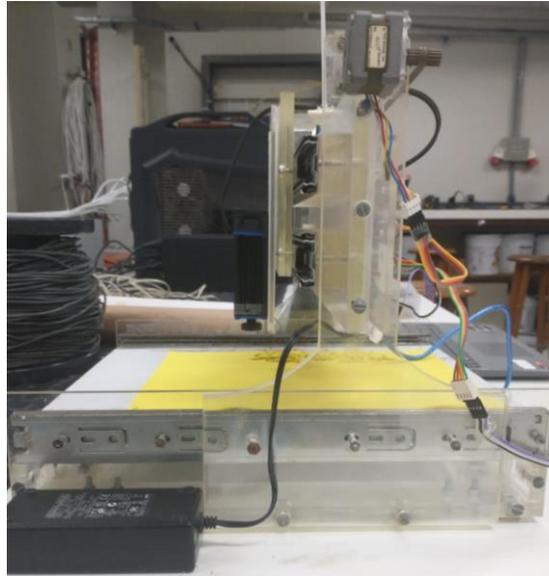
Fonte: Autor (2022).

Figura 28 - Traseira da máquina desse projeto



Fonte: Autor

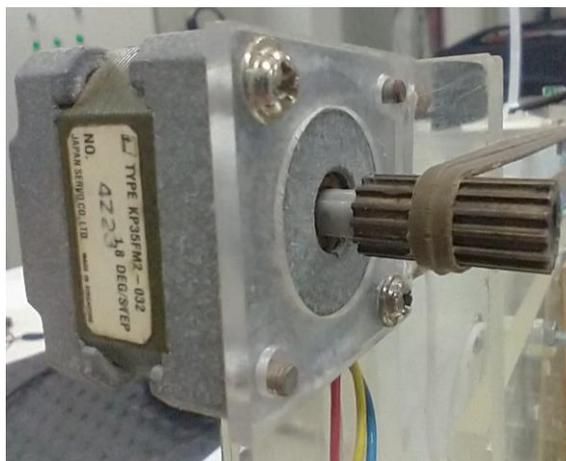
Figura 29 - Lateral da máquina desse projeto



Fonte: Autor

Os dois motores (Figura 30) do tipo bipolar de 4 fios KP35FM2-032 do projeto anterior foram reaproveitados, um para cada eixo.

Figura 30 - Motor de passo KP35FM2-032



Fonte: Autor

Tabela 2 - Dados para o motor de passo KP35FM2-032

Identificador	Tipo	Tensão	Ângulo de passo	Resistência de fase	Corrente
KP35FM2-044	Bipolar	24V	1.8°	8Ω	0.5A

Fonte: (JAMECO, 2022)

A resolução da máquina, ou sua medida de passos por milímetros, pode ser medida através da equação 1 e deve considerar todo sistema de transmissão, isto é, o impacto na quantidade de giro devido à configuração de micro passos, da correia, da polia, e de quaisquer outras interferências. Esta resolução é um parâmetro importante usado na calibração do software de controle.

Os parâmetros podem ser obtidos através da medição do comprimento percorrido pela máquina para uma dada quantidade de passos, conforme equação 1.

$$\text{Resolução} = \frac{\text{passos}}{\text{mm}} \quad (1)$$

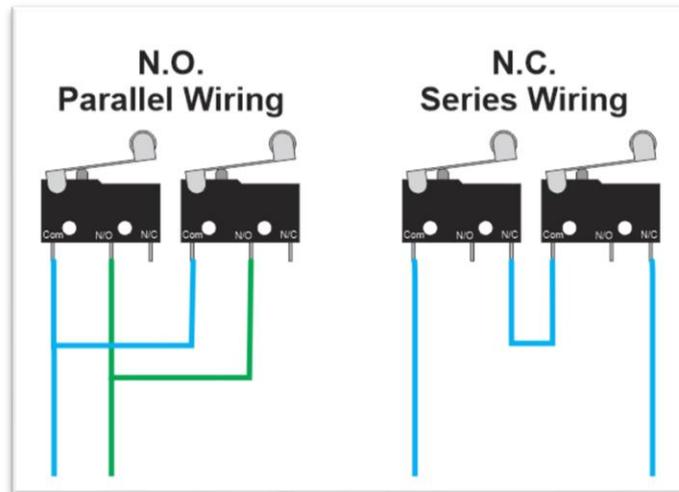
Enviou-se um comando de 17760 passos e mediu-se 159mm com auxílio de um paquímetro, portanto, obteve-se 111.698 passos/mm, ou aproximadamente 112. O mesmo resultado foi obtido para o eixo Y.

O deslocamento máximo por eixo, após a inclusão das chaves fim de curso, foi medido com auxílio de uma régua comum, totalizando 200mm no eixo X e 260mm no eixo Y.

- **Chaves fim de curso**

Há várias configurações possíveis para a utilização das chaves fim de curso. Elas podem ser utilizadas em apenas um dos eixos, ou em todos. Quando duas chaves por eixo são utilizadas, elas podem estar cada uma ligada a uma entrada da placa controladora ou conectadas em paralelo ou em série.

Figura 31 - Chaves fim de curso mecânicas



Fonte: (Gbrl (CNC Controller) For ESP32, 2021)

Controladores embarcados têm recursos limitados, por isso, quando se utilizam duas chaves por eixo, é comum conectá-las a apenas uma entrada da placa. Para isso, é preciso unir as chaves em uma configuração paralela com os pinos de conexão normalmente aberta, ou série com os pinos de conexão normalmente fechada. A conexão normalmente fechada possui uma vantagem: o sinal é detectado durante a operação normal da máquina. Ou seja, tanto a ativação da chave quanto uma falha nos fios causam a desconexão do sinal, enquanto uma falha na fiação em uma configuração normalmente aberta não seria detectada, por isso, a configuração série normalmente fechada foi escolhida para esse trabalho para proteção e ativação de funções como homing (ver 3.6.1.1: homing) e hard limits (ver 3.6.1.1: limits). Graças a essa proteção contra falhas nos fios, não há necessidade de se utilizar fios de alta confiabilidade, já que uma falha seria imediatamente detectada.

A Figura 32 mostra a posição de uma das chaves abaixo da mesa móvel e duas peças de acrílico coladas embaixo da mesa para ativar as chaves quando a mesa chegar no limite do movimento.

Figura 32 - Chave fim de curso



Fonte: Autor

- **Recuperação da estrutura mecânica**

O processo de recuperação da parte mecânica da máquina envolveu a desmontagem do trilho com guias lineares de esferas para lubrificação e reposicionamento das esferas. Além disso, foi feita a troca de parafusos que eram curtos e ficaram folgados nos furos sem rosca no acrílico e madeira, que ocasionalmente causavam travamento do eixo quando saíam um pouco dos furos e topavam com o trilho do eixo.

### **3.2 Atuador LASER**

O módulo LASER escolhido para este trabalho foi o LD3070LA da VoidMicro, Figura 33. Trata-se de um LASER de baixa potência feito especificamente para projetos CNC com Arduino (ou placa similar) de corte, gravação e confecção de peças artísticas a LASER (VoidMicro, 2022).

É um LASER adequado para pequenas aplicações de laboratório e que será usado por pessoas não muito familiarizadas com a tecnologia LASER/CNC.

Figura 33 - LASER LD3070LA 5.5W -



Fonte: (VoidMicro, 2022)

Segue tabela de dados:

Tabela 3 - Dados do LASER LD3070LA 5.5W

Tamanho (mm)	Potência de saída ótica (W)	Comprimento de Onda (nm)	Cor	Tensão de Operação (V)	Potência de entrada (W)	Frequência preferível de operação (kHz)	Distância Focal (mm)
30x30x90	2.5	445-450	Azul	12	5.5	5	20-70

Fonte: (VoidMicro, 2022)

O fabricante alega que esse LASER é capaz de gravar em diversos materiais, tais como: papel, madeira, tecidos, plástico, couro, compensado, papel espuma e alumínio anodizado. Mas que não é capaz de gravar em Metais. Aço inoxidável e materiais reflexivos.

Apesar da baixa potência, ainda é o suficiente para causar danos a visão caso o feixe seja olhado diretamente, portanto seu uso requer, impreterivelmente, o uso de óculos de proteção, que acompanha o LASER na compra.

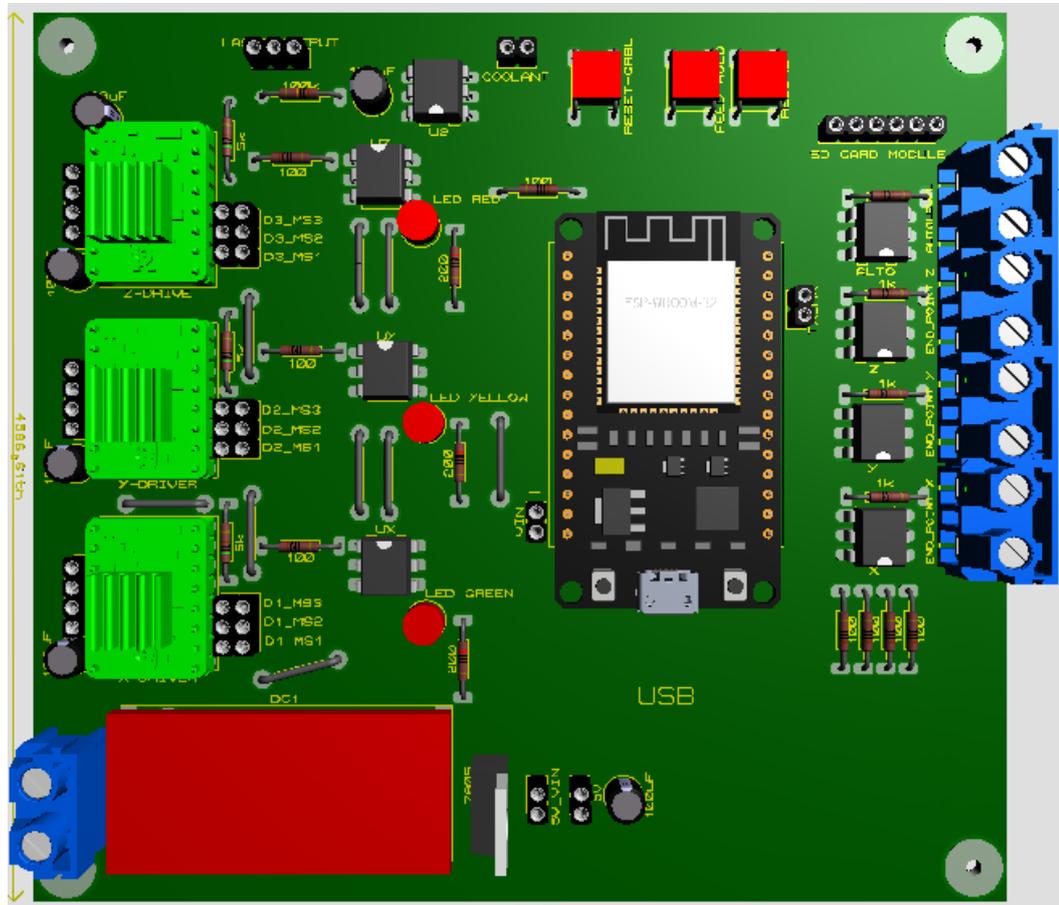
### 3.3 Plataforma de Controle

Para a realização desse trabalho, optou-se por desenvolver a plataforma de controle no *software* Proteus, cuja representação 3D está mostrada na Figura 34. Consistindo em uma CNC *Shield*, ou PCI, de baixo custo para facilitar a conexão e integração do controlador, dos drivers, botões e alguns circuitos condicionadores de sinal. Essa placa suporta comunicação serial e conectores para sensores e atuadores, como os motores e chaves fim-de-curso, além de fazer a regulagem dos níveis de tensão e emitir sinais luminosos para movimento em cada um dos eixos através de LEDs.

Optou-se pela construção de uma placa de propósito geral com três espaços para drivers de motores, apesar da máquina a LASER usar apenas dois, e com quatro entradas para sensores, sendo estas destinadas para até três chaves fim-de-curso e uma sonda. Sonda é um elemento de contato comumente usada em máquinas fresadoras para mapear as irregularidades dos materiais a serem trabalhados a fim que essas deformações possam ser levadas em consideração nos trabalhos para que a qualidade seja preservada. Desta forma, a plataforma de controle desenvolvida para este trabalho pode ser aplicada em outras possíveis aplicações de máquinas CNC, e ter sua estrutura modificada, ou melhorada.

Procurou-se organizar os componentes a fim de minimizar interferências e facilitar conexões: Elementos de potência, como entrada de potência e saída dos motores à esquerda, sinais lógicos, como cartão microSD e botões acima, juntamente com o conector do LASER, e entradas lógicas de sensores à direita (Figura 34).

Figura 34 - Plataforma de controle desenvolvida



Fonte: Autor (2022)

Figuras que descrevem o projeto eletrônico da placa de controle podem ser conferidas no APÊNDICE A.

O microcontrolador ESP32-D0WDQ6 do módulo ESP32-WROOM-32 contido na placa de desenvolvimento Devkit C V1 de 30 pinos (Figura 35) foi escolhido devido a sua ampla disponibilidade no mercado, preço acessível e funcionalidades sem fio como conexão *wi-fi* e *bluetooth*.



de *sleep* ligado eletricamente ao de *reset* é o suficiente para reprimir ambas as funções (ALLEGRO, 2022).

- **Limite de corrente**

Limitar a corrente máxima que o *driver* fornecerá é um passo crítico para garantir que nem os componentes eletrônicos, nem os motores, serão danificados durante a operação da máquina.

Conforme *data sheet* (MAKERSGUIDE, 2022), o ajuste de corrente no *driver* A4988 se dá da seguinte forma: O maior valor de corrente limitante é configurado pela seleção de  $R_{SX}$  e pelo valor de tensão no pino  $V_{REF}$ . A função de transdutância é aproximada pelo maior valor da corrente limitante,  $I_{TripMAX}$  (A), a qual é definida pela Equação 2 conforme *datasheet* (ALLEGRO, 2022):

$$I_{TripMAX} = \frac{V_{REF}}{8 * R_S} \quad (2)$$

A resistência  $R_{SX}$ , no *driver* desse projeto, é um  $R_{10} = 0.1$  Ohm. Logo, para uma corrente máxima de 0.5 A (Tabela 2 - Dados para o motor de passo KP35FM2-032), a tensão de referência deve ser de 400mV ( $0.5 * 8 * 0.1 = 0.4$  V). Deve-se, então, ligar o *driver* e girar o seu potenciômetro até que a tensão medida no próprio terminal do potenciômetro seja 0.4V.

- **Micro passo**

Um *driver* como o A4988 permite alta resolução por permitir a configuração de micro passos. Isso é realizado energizando as bobinas com níveis intermediários de corrente.

Os pinos (MS1, MS2 e MS3) de resolução (tamanho do passo) permitem a seleção de até cinco resoluções de passo de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 4 - Configurações de micro passo do driver A4988

MS1	MS2	MS3	Resolution
Low	Low	Low	Full Step
High	Low	Low	½ Step
Low	High	Low	¼ Step
High	High	Low	1/8 Step
High	High	High	1/16 Step

Fonte: (MAKERGUIDE, 2022).

As três entradas têm resistores de *pull-down* (conectados na referência elétrica) de 100 kΩ, portanto deixar os três pinos desconectados equivale a selecionar o modo de passo completo, ou *full-step* (MAKERGUIDES, 2022).

Operar em micro passos (*microstepping*) aumenta a resolução (diminui o deslocamento angular por passo) dos motores, porém diminui o torque e a velocidade do motor, este fenômeno é chamado de relação de compromisso, mas como uma máquina LASER não requer muito torque, pode-se adotar *microstepping* a fim de aumentar a resolução dos trabalhos.

Esse trabalho adotou a resolução máxima dos drivers: 1/16, ou seja, todos os pinos MS em nível lógico alto.

## 3.5 GRBL ESP32

### 3.5.1 Considerações Gerais

GRBL é um software gratuito, de código aberto e de alto desempenho para controlar o movimento de máquinas (gnea/grbl, 2021).

O projeto do GRBL para Arduino foi portado para funcionar também em placas ESP32 e mais desenvolvido. A Espressif vende o ESP32 como chip, módulo e placa de desenvolvimento. Na maioria dos casos, você vai querer a placa de

desenvolvimento, pois ela adiciona a conectividade USB ao ESP32 (Grbl (CNC Controller) For ESP32, 2021).

As placas de desenvolvimento mais utilizadas com o GRBL-ESP32 são:

- ESP32 DevKit
- NodeMCU-32S
- DOIT ESP32 DEVKIT

Cada módulo ESP32 tem conexões de pinos com funções específicas, por isso, é necessário compilar o firmware de maneira customizada para a máquina em questão (Grbl (CNC Controller) For ESP32, 2021).

O GRBL-ESP32 é configurado para iniciar um ponto de acesso (Wi-Fi) ao ser inicializado pela primeira vez, mas pode ser configurado para se conectar à rede do usuário. Para isso, basta configurar o nome da rede e sua senha diretamente no arquivo config.h antes de programar o módulo ou através do WebUi.

Figura 36 - Página de configuração do GRBL no WebUi

Label	Value	Help
\$0	 3 <input type="button" value="Set"/>	Step pulse, microseconds
\$1	 250 <input type="button" value="Set"/>	Step idle delay, milliseconds
\$2	 0 <input type="button" value="Set"/>	Step port invert, mask
\$3	 0 <input type="button" value="Set"/>	Direction port invert, mask
\$4	 0 <input type="button" value="Set"/>	Step enable invert, boolean
\$5	 1 <input type="button" value="Set"/>	Limit pins invert, boolean
\$6	 0 <input type="button" value="Set"/>	Probe pin invert, boolean
\$10	 1 <input type="button" value="Set"/>	Status report, mask

Fonte: Autor (2022)

Figura 37 - Página de configuração de conexões Wi-Fi e Bluetooth no WebUi.

Label	Value
Station SSID	<input type="text" value="GRBL_ESP"/> Set
Station Password	<input type="password" value="*****"/> Set
Station IP Mode	<input type="text" value="DHCP"/> Set
Station Static IP	<input type="text" value="0.0.0.0"/> Set
Station Static Gateway	<input type="text" value="0.0.0.0"/> Set
Station Static Mask	<input type="text" value="0.0.0.0"/> Set
AP SSID	<input type="text" value="GRBL_ESP"/> Set
AP Password	<input type="password" value="*****"/> Set

Fonte: Autor (2022)

Para se conectar ao WebUi, basta entrar no endereço <http://192.168.0.1> após se conectar à placa pelo ponto de acesso Wi-Fi. Caso o ESP esteja funcionando conectado à sua rede, será preciso checar o IP através de uma porta serial, como a do Arduino, ao se inicializar o ESP.

O usuário pode se conectar com o *software* através do WebUi, de um software GCODE, ou através de qualquer interface serial que permita a transmissão de comandos \$. Comandos \$ é a linguagem de comandos que o GRBL interpreta.

Tabela 3: Comandos \$.

\$Cmd
\$Settings/Restore or \$RST
\$GCode/StartupLines or \$N
\$Build/Info or \$I
\$System/Sleep or \$SLP
\$Home/C or \$HC
\$Home/B or \$HB

\$Home/A or \$HA
\$Home/Z or \$HZ
\$Home/Y or \$HY
\$Home/X or \$HX
\$Motor/Disable or \$MD
\$Home or \$H
\$GCode/Offsets or \$#
\$Settings/Stats or \$V
\$Settings/Erase or \$NVX
\$Alarm/Disable or \$X
\$GCode/Check or \$C
\$GCode/Modes or \$G
\$Errors/List or \$E
\$Alarms/List or \$A
\$Commands/List or \$CMD
\$Settings/ListChanged or \$SC
\$Settings/List or \$S
\$GrblNames/List or \$L
\$ExtendedSettings/List or \$+
\$GrblSettings/List or \$\$
\$Jog or \$J
\$State or \$T
\$Help or \$
\$WebUI/Help or \$ESP
\$WebUI/Help or \$ESP0
\$Sta/Setup or \$ESP103 =IP=ipaddress MSK=netmask GW=gateway
\$System/IP or \$ESP111
\$Radio/State or \$ESP115 =STA AP BT OFF
\$SD/Status or \$ESP200
\$SD/List or \$ESP210
\$SD/Delete or \$ESP215 =file_or_directory_path
\$SD/Run or \$ESP220 =path

\$SD/Show or \$ESP221 =path
\$WebUI/List or \$ESP400
\$WebUI/Set or \$ESP401 =P=position T=type V=value
\$WiFi/ListAPs or \$ESP410
\$System/Stats or \$ESP420
\$System/Control or \$ESP444 =RESTART
\$Notification/Send or \$ESP600 =message
\$Notification/Setup or \$ESP610 =TYPE=NONE PUSHOVER EMAIL LINE T1=token1 T2=token2 TS=settings
\$LocalFS/ListJSON =path
\$LocalFS/List =path
\$LocalFS/Run or \$ESP700 =path
\$LocalFS/Show or \$ESP701 =path
\$LocalFS/Format or \$ESP710 =FORMAT
\$LocalFS/Size or \$ESP720
\$Firmware/Info or \$ESP800

Fonte: Autor (2022)

### 3.5.2 Configurações de Operação do GRBL

O arquivo config.h acumula várias configurações de operação que são customizáveis. Abaixo algumas configurações importantes.

- **Acesso via Wi-Fi**

Para que o ESP32 se conecte a rede do usuário automaticamente desde a primeira inicialização, é preciso configurar no ESP3D Web UI, ou ativar as configurações no arquivo configs.h, nas linhas especificadas a seguir antes de programar o ESP:

```
#define CONNECT_TO_SSID "your SSID"
#define SSID_PASSWORD "your SSID password"
```

Se o ESP não conseguir se conectar a uma rede, ele iniciará o modo de Ponto de Acesso, no qual ele funciona como provedor de um sinal *Wi-fi* para que outros dispositivos se conectem a ele.

- **Autenticação**

Neste mesmo arquivo é possível também encontrar as configurações de autenticação. Embora não seja uma barreira tão segura contra *hackers experts*, traz algum nível de segurança contra acessos indesejados.

```
#ifdef ENABLE_AUTHENTICATION
const char* const DEFAULT_ADMIN_PWD = "admin";
const char* const DEFAULT_USER_PWD = "user";
const char* const DEFAULT_ADMIN_LOGIN = "admin";
const char* const DEFAULT_USER_LOGIN = "user";
#endif
```

- **Homing**

*Homing* é um comando que se utiliza das chaves fim de curso para detectar a posição da máquina e voltar às coordenadas de origem.

Quando a opção de Homing está habilitada e o usuário instalou chaves fim de curso, o GRBL inicializará em um estado de alarme para indicar que não sabe sua posição atual e forçar o usuário a executar o Homing, ou sobrescrever o travamento, antes de começar a operar. Abaixo mostra-se a configuração que define o travamento da máquina ao ser inicializada quando a função de *Homing* está ativada.

```
#define HOMING_INIT_LOCK // Comment to disable
```

- **Limits**

*Soft Limits* (\$Limits/Soft=On) é uma função que usa os valores de posição internos para determinar se um determinado movimento vai atingir os limites da máquina. Esta função usa o parâmetro de máximo deslocamento (\$13x) para esta determinação. Se for o caso, a máquina entrará em estado de alarme 2. Será preciso resetar a máquina, mas a posição não foi perdida, portanto, não é preciso usar a função de *Homing*. Para ignorar esta função em um eixo, basta atribuir o máximo deslocamento de um eixo para zero.

*Hard Limits* (\$Limit/Hard=On) usa as chaves para parar a máquina. É uma boa configuração de segurança, mas causa uma parada imediata não controlada. Será preciso usar a função de *Homing* antes de usar a máquina novamente. Máquinas CNC tendem a criar muito ruído eletromagnético e podem causar sinais de fim de curso falsos. Por isso, é preciso testar bastante a máquina antes de usar essa configuração.

As chaves fim de curso podem ser do tipo mecânica, ou eletrônica, mas como são críticas para o funcionamento de uma função de segurança, precisam de um sistema confiável de filtragem de ruídos. Os ruídos eletromagnéticos podem causar leituras erradas. Estes ruídos são geralmente picos curtos de baixa energia e podem ser reduzidos de várias formas. Uma delas é utilizando blindagem no cabeamento das chaves, que deve ser aterrada em apenas uma ponta (Grbl (CNC Controller) For ESP32, 2021).

Figura 38 - Cabeamento torcido e blindado contra ruídos eletromagnéticos

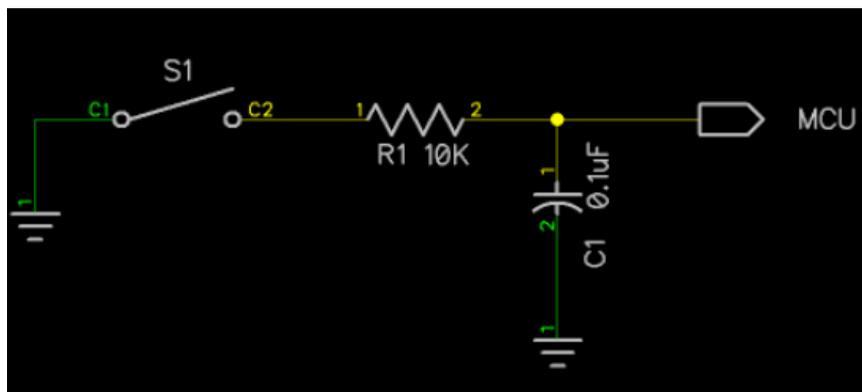


Fonte: (Grbl (CNC Controller) For ESP32, 2021)

Outra forma é através da torção conjunta dos fios, o que anula as tensões induzidas. Os fios dos sensores devem ser mantidos longe dos fios de alimentação dos motores.

A utilização de filtros passivos, como um circuito RC, ou digitais também é comum.

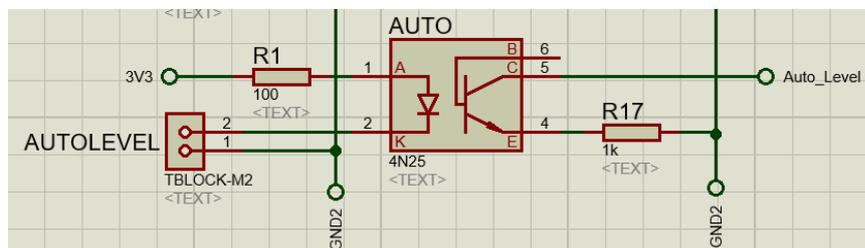
Figura 39 - Filtro passivo RC



Fonte: (Grbl (CNC Controller) For ESP32, 2021)

Neste trabalho decidiu-se por utilizar opto-acopladores entre as chaves fim de curso e os pinos do microcontrolador como estratégia de filtragem de sinal:

Figura 29: Filtragem de sinal com opto-acopladores.



Fonte: Autor (2022)

Assim, quando a chave é ativada, ela fecha o circuito do LED, que por sua vez ativa o foto-transistor, enviando um sinal para o pino do controlador.

Da mesma forma, o pino de reset deve filtrar ruídos para evitar reinicializações indesejadas.

### **3.5.3 Modo LASER**

A principal diferença entre a operação padrão do GRBL e o modo LASER é como a saída do fuso/LASER é controlada com os movimentos envolvidos. Toda vez que um estado do *spindle* (M3, M4, M5), ou sua velocidade (Sxxx) é alterada, o GRBL pára e permite que o *spindle* mude para depois continuar. Este é o procedimento operacional normal para uma máquina fresadora CNC. Ela precisa de tempo para mudar de velocidade. No entanto, se um LASER iniciar e parar assim para cada mudança no atuador, isso levará a cortes/gravuras irregulares! O novo Modo LASER do GRBL evita paradas desnecessárias sempre que possível e adiciona um novo modo de potência de LASER dinâmica que dimensiona automaticamente a potência com base na velocidade atual relacionada à taxa programada. Assim, você pode obter resultados super limpos e nítidos, mesmo em uma máquina de baixa aceleração! “\$32 = 1” é a configuração que ativa o Modo LASER. “\$31” configura a potência mínima e “\$30” a potência máxima (Grbl (CNC Controller) For ESP32, 2021).

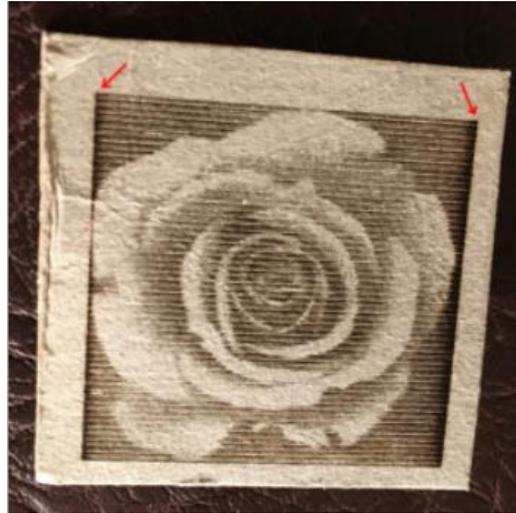
- **M3 Modo de Potência de LASER Constante**

Simplemente mantém a potência do LASER como programada, independentemente se a máquina estiver se movendo, acelerando ou parada. Permite melhor controle do estado do LASER. Geralmente leva à cortes mais consistentes em materiais mais difíceis (LASERGRBL, 2022).

- **M4 Modo de Potência de LASER Dinâmica**

Quando o GRBL está configurado no modo LASER, M4 não significa “velocidade do *spindle*”, mas sim “potência do LASER dependente do movimento”. Durante a execução de um trabalho de gravação, o LASER deve acelerar e desacelerar para seguir as direções a serem gravadas. No modo M3, isso pode levar a queimaduras mais severas pois o movimento é mais lento (LASERGRBL, 2022).

Figura 40 - Gravura a LASER em modo M3. Nota-se queimaduras mais severas onde a máquina se move mais lentamente



Fonte: (LASERGRBL, 2022)

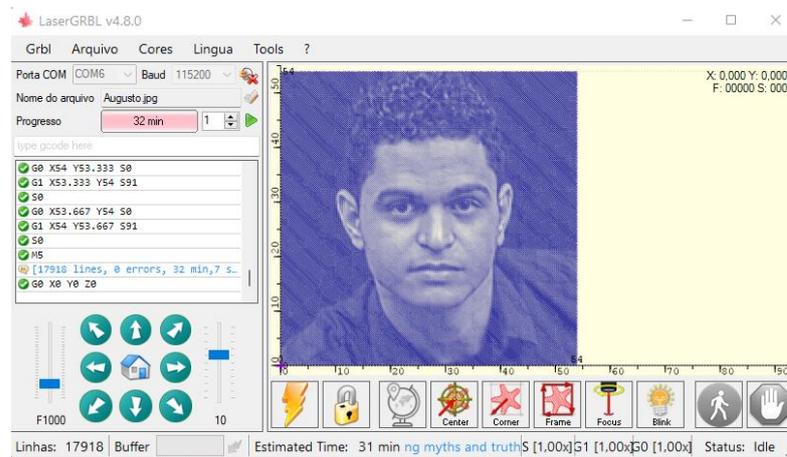
O modo de potência de LASER dinâmico ajustará automaticamente a potência do LASER com base na velocidade atual em relação à taxa programada. Essencialmente, garante que a quantidade de energia do LASER ao longo de um corte seja consistente, mesmo que a máquina esteja parada ou acelerando ativamente. Isso é muito útil para gravação e corte precisos e limpos em materiais simples em uma grande variedade de métodos de geração de código G por programas CAM (LASERGRBL, 2022).

O GRBL calcula a potência do LASER com base na suposição de que a potência do LASER é linear com a velocidade e o material. Muitas vezes, este não é o caso. Os LASERs podem cortar de forma diferente em diferentes níveis de potência e alguns materiais podem não cortar bem em uma determinada velocidade e/ou potência. Em suma, isso significa que o modo de energia dinâmico pode não funcionar para todas as situações (LASERGRBL, 2022).

### 3.6 G-Code Sender

LaserGRBL é um dos softwares para gravuras a LASER. LaserGRBL é capaz de carregar qualquer imagem e enviá-la à máquina de gravação em poucos cliques (LASERGRBL, 2022).

Figura 41 - Janela inicial do LaserGRBL com uma imagem carregada e comandos recém executados.



Fonte: Autor (2022)

Este software é versátil, pois possui várias informações importantes bem condensadas em tela e vários botões com macros úteis, como:

- **Reset**

Opera um soft reset.

- **Unlock**

Sai do estado de alarme.

- **Homing**

Executa a operação de *homing*.

- **Frame**

Desenha o contorno da figura a ser gravada.

- **Focus**

Liga o LASER com potência baixa (3%) para que o usuário ajuste o foco.

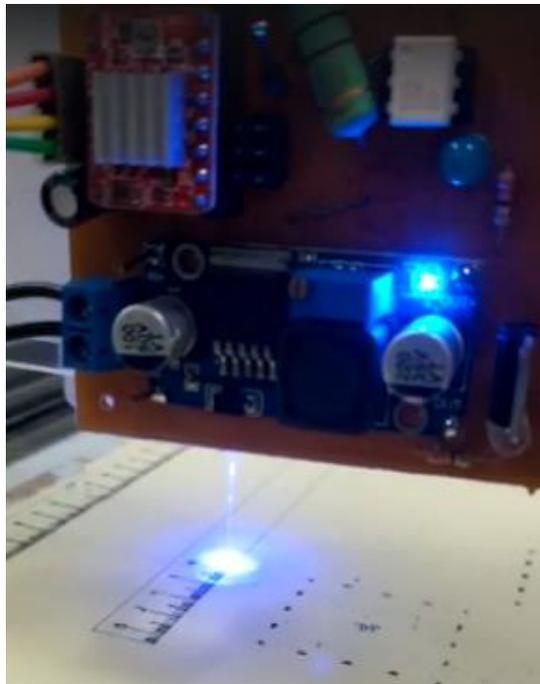
- **Blink**

Liga o LASER por um curto período.

## 4 RESULTADOS

A Figura 42 mostra a máquina desse trabalho fazendo a gravação de uma régua de 159mm, em escala real, em papel cartão amarelo com potência constante a 70%. Ao lado da régua, vê-se pontos espaçados por um centímetro para medição da precisão. No centro da figura está um regulador de tensão e, no canto esquerdo superior, um dos *drivers*.

Figura 42 - Máquina CNC LASER durante gravação



Fonte: Autor

De acordo com as medições mencionadas no tópico 3.1, mediu-se 111.698 passos/mm. No entanto, como o valor calibrável na máquina é inteiro, foi configurado na máquina 112, o número natural mais próximo. Há, portanto, um erro de 0.302 passo por mm. Isso equivale a  $159 \times 0.302$  passos = 48.018 passos de erro para 159mm. Ou de aproximadamente

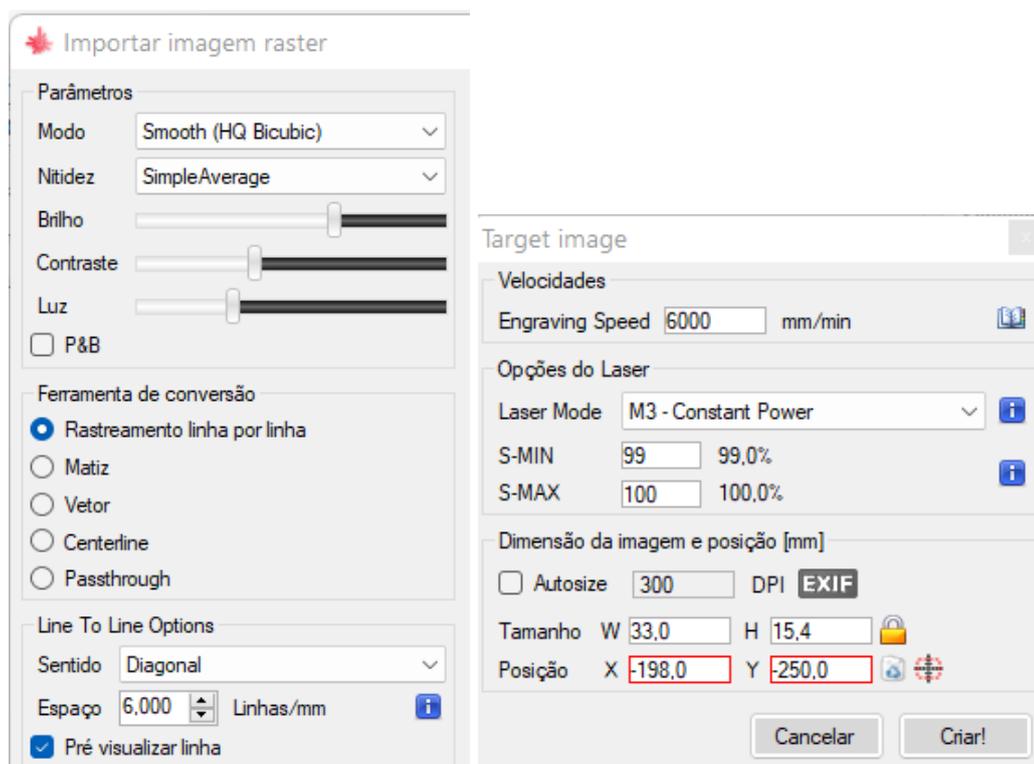
$$Erro = \frac{48.018 \text{ passos}}{111.698 \frac{\text{passos}}{\text{mm}}} * \frac{100\%}{159\text{mm}} = 0.42989\text{mm} * \frac{100\%}{159\text{mm}} \cong 0.27\% \quad (3)$$

que é um valor desprezível para a maioria das aplicações desejadas.

Na prática, devido a outras influências, como as folgas da correia dentada e o diâmetro do foco do LASER, observa-se que a resolução aumenta até que, na interface do LaserGRBL, seja configurado seis linhas por milímetro, pois uma resolução maior faz as linhas se sobreporem, causando multiplas passadas do LASER e uma queima mais intensa do material. Essa resolução prática equivale a

$$Resolução \text{ observável} = \frac{1\text{mm}}{5} * \frac{112\text{passos}}{\text{mm}} * \frac{1\text{mm}}{111.968\text{passos}} \cong 0.200057\text{mm} \quad (4)$$

Figura 43 - Configurações para corte ou gravação no LaserGRBL



Fonte: Autor

A Figura 43 mostra as opções de configuração de uma imagem antes do corte, ou gravação no LaserGRBL. Há muitas opções que devem ser escolhidas de acordo com o tipo de trabalho desejado e do material. Para os resultados apresentados nessa sessão, foi mantida uma velocidade máxima fixada em 6000mm/min. A opção de “Ferramenta de conversão” permite escolher o modo de processamento da imagem. Por exemplo, a opção “Vetor” vetoriza a imagem, o que pode ser utilizado para gravar apenas os contornos da imagem. A Figura 44 apresenta uma gravura em papelão do contorno de uma imagem vetorizada de um retrato. Como papelão é um material escuro, foi possível fazer a gravação com 40% de potência em modo constante, sem, porém, atravessar o material, visto que ele é espesso.

Figura 44 - Gravura de contorno de um retrato em papelão



Fonte: Autor

O papel madeira é semelhante ao papelão, porém fino como papel comum. Uma tentativa da mesma gravação da Figura 44 em papel madeira mostrou-se demasiadamente cortante, conforme Figura 45.

Também na Figura 45, fez-se a gravação do brasão da UFPE no modo de potência dinâmica a 40%. A gravação foi feita com traços na diagonal para equilibrar o desgaste dos motores. Observa-se que mesmo no modo dinâmico, as bordas da

imagem queimaram o suficiente para atravessar o papel madeira, enquanto o centro ficou muito claro em comparação com o restante da imagem.

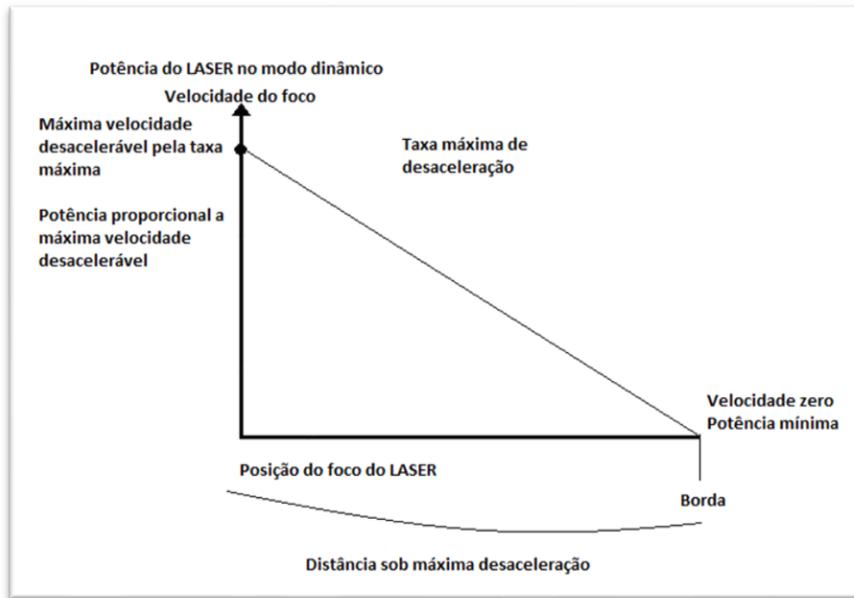
Para uma gravação de melhor qualidade, dever-se-ia, primeiramente, baixar a potência máxima, ou mínima, para evitar a queima da borda na região de máxima desaceleração do foco do LASER (Figura 46). Isso faria com que a região central ficasse ainda mais clara, conduzindo a conclusão de que também seria necessário baixar a velocidade de deslocamento, o que diminui a distância sob máxima desaceleração. A vantagem é que menos energia seria usada, enquanto que a desvantagem é que o tempo de gravação seria aumentado.

Figura 45 - Gravuras em papel madeira com potência constante e dinâmica



Fonte: Autor

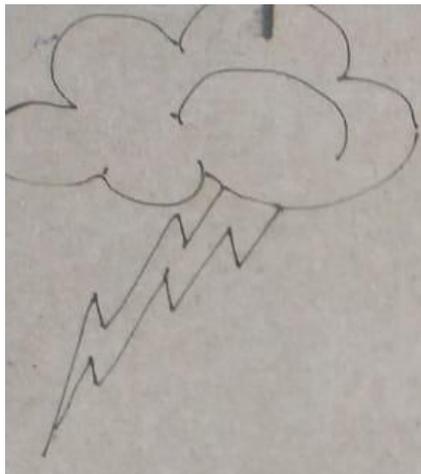
Figura 46 - Características do modo de potência dinâmica



Fonte: Autor.

Quando a gravação desejada é de contorno de desenho simples, no entanto, o papel madeira se mostrou adequado, pois é possível configurar altas velocidades em baixa potência constante e terminar a gravação em pouquíssimo tempo.

Figura 47 - Gravura de contorno de desenho simples em papel madeira



Fonte: Autor

Por fim, também foi feita a gravação de uma arte em emborrachado, conforme Figura 48. Emborrachado é um material macio de fácil corte. Mesmo com a mínima intensidade, o LASER é capaz de atravessá-lo. Gravações, no entanto, não ficam tão boas, pois parte do material pode ficar preto por queimar e não evaporar uniformemente. Esta gravação foi feita com 40% da potência constante.

Figura 48 - Gravação em emborrachado



Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a potência e a velocidade de gravação são variáveis que influenciam muito a qualidade final da gravação, enquanto o modo de potência, constante ou dinâmica, apesar de fazer alguma, não apresentou diferenças muito significativas nos resultados. Materiais de cores mais claras requerem um tempo maior de exposição ao feixe LASER para serem gravados independentemente da potência escolhida, enquanto materiais escuros podem ser gravados com baixa potência.

O desenvolvimento deste trabalho foi muito importante para o aprendizado acadêmico, pois nele foi possível pôr em prática conceitos de diversas disciplinas do curso de Engenharia de Controle e Automação, com ênfase nas disciplinas de microcontroladores, instrumentação e robótica. Também foi possível expandir o conhecimento para as áreas de mecânica e física, proporcionando o aprimoramento profissional e acadêmico do autor.

Um estudante, ou profissional de engenharia, treinado para utilizar e devidamente informado das especificidades da máquina, poderá utilizá-la sem problemas para corte e gravação dos materiais especificados pelo fabricante do LASER.

A máquina CNC LASER desenvolvida agrega valor didático e apoia projetos de pesquisa e desenvolvimento no DEE, e como todo o material de projeto da máquina é propriedade do departamento, é possível que ocorra a melhoria contínua do equipamento, o que não aconteceria com uma máquina comercial.

## REFERÊNCIAS

- ABICOR BINZEL. Soldagem a LASER, 2022. Disponível em: <<https://www.binzel-abicor.com/BR/por/solutions/process/laser-welding/>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- ALLEGRO. A4988. **DMOS microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection**, ago. 2022. Disponível em: <[https://www.pololu.com/file/0J450/a4988\\_DMOS\\_microstepping\\_driver\\_with\\_translator.pdf](https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf)>. Acesso em: 1 out. 2022.
- ANTONIN BOULAND, P. D. D. F. M. G. P. M. J.-P. A study of laser-engraving surfaces portability on polymer for the automotive industry. **CLEO/Europe-EQEC 2019**, 2019.
- AUTOCORE. **Castanha T8 8mm Trapezoidal com Sistema Anti Folga**, 27 jul. 2022. Disponível em: <<https://www.autocorerobotica.com.br/castanha-t8-8mm-trapezoidal-com-sistema-anti-folga>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- AUTODESK. EAGLE/Fusion 360. **PCB design made easy for every engineer**, 2022. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/eagle/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- BAÚ DA ELETRÔNICA. **Baú da Eletrônica**, ago. 2022. Disponível em: <<https://www.baudaeletronica.com.br/motores/motor-de-passo/nema-23>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- CHOUDHARY, R. **CNC PCB Milling and Wood Engraving**. International Conference On Smart Technology for Smart Nation. [S.l.]: [s.n.]. 2017.
- ESPRESSIF. ESP32-DevKitC V4 Getting Started Guide. **ESP-IDF Programming Guide**, 2021. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- FABRICADEBOLSO. **Placa Cnc Shield V4 Arduino Uno Impressora 3d Reprap Grbl**, 2021. Disponível em: <<https://loja.fabricadebolso.com.br/produto/placa-cnc-shield-v4-arduino-uno-impressora-3d-reprap-grbl.html>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- FERNANDES, F. D. D. S.; CASTANHO, G. M.; GOMES, L. D. O. **Fresa CNC Controlada por Microcontrolador**. Curitiba. 2017.
- FERNANDO K tecnologia. **Motor de Passo de 4, 5, 6 e 8 fios**, 2022. Disponível em: <<https://www.fernandok.com/2018/01/motor-de-passo-de-4-5-6-e-8-fios.html>>. Acesso em: 01 out. 2022.
- GNEA/GRBL. **GitHub**, 16 dez. 2021. Disponível em: <<https://github.com/gnea/grbl/wiki>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- GRBL (CNC Controller) For ESP32. **GitHub**, 03 dez. 2021. Disponível em: <[https://github.com/bdring/Grbl\\_Esp32](https://github.com/bdring/Grbl_Esp32)>. Acesso em: 1 out. 2022.
- IBRAHIM, D. Advanced PIC microcontroller Project in C. **Newnes**, 2008.
- JAMECO. Jameco. **Catalogs**, 20 Fevereiro 2022. Disponível em: <<https://www.jameco.com/Jameco/catalogs/c111/P113.pdf>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- K, F. Fernando K Tecnologia. **Router e Plotter WiFi com Webserver em ESP32**, 2022. Disponível em: <<https://www.fernandok.com/2019/02/router-e-plotter-wifi-com-webserver-em.html>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- KALATEC AUTOMAÇÃO. Fusos de Esferas. **Kalatec Automação**, 27 jul. 2022. Disponível em: <<http://www.kalatec.com.br/fusos-de-esferas-aplicacao/>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- KUKA. KR 1000 Titan. **kuka**, 26 jul. 2022. Disponível em: <<https://www.kuka.com/pt-br/produtos-servi%C3%A7os/sistemas-de-rob%C3%B4/rob%C3%B4s-industriais/kr-1000-titan>>. Acesso em: 1 out. 2022.
- LASERAX. **HOW DOES LASER CLEANING WORK IN 5 STEPS**, ago. 2022. Disponível em: <<https://www.laserax.com/blog/how-does-laser-cleaning-work>>. Acesso em: 1 out. 2022.

LASERGRBL. **LASERGRBL FREE LASER ENGRAVING**, abr. 2022. Disponível em: <<https://lasergrbl.com/>>. Acesso em: 1 out. 2022.

LIN PRASETYANI, P. S. P. 450nm Laser Diode Beam Shaping, 2022.

MAKERGUIDES. How to control a stepper motor with A4988 driver and Arduino. **Makerguides**, 2022. Disponível em: <<https://www.makerguides.com/a4988-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/>>. Acesso em: jan. 10.

MAKERSGUIDE. DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection. **makersguide**, 20 Fevereiro 2022. Disponível em: <<https://www.makerguides.com/wp-content/uploads/2019/02/A4988-Datasheet.pdf>>. Acesso em: 1 out. 2022.

MARINO Store. **Fuso Trapezoidal TR8 passo 8mm x 400mm c/ Castanha**, 27 jul. 2022. Disponível em: <<https://www.marinostore.com/impressora-3d-cnc/fuso-trapezoidal-tr8-passo-8mm-x-400mm-c-castanha>>. Acesso em: 1 out. 2022.

MECTROL. Guia Linear de Esfera, 2022. Disponível em: <<https://mectrol.com.br/guia-linear-de-esfera>>. Acesso em: 01 out. 2022.

MISCHIANTI, R. DOIT ESP32 DEV KIT v1 high resolution pinout and specs. **Renzo Mischianti - A blog of digital electronics and programming**, 17 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.mischianti.org/2021/02/17/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>>. Acesso em: 1 out. 2022.

OVERBY, A. CNC Machining Handbook. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011.

PMACH. Centros de usinagem de Coluna móvel X Centro de usinagem de Mesa móvel. **Pmach Precision Machines**, 26 jul. 2022. Disponível em: <[http://www.pmach.com.br/informacoes-tecnicas/coluna\\_movel\\_x\\_centro\\_mesa\\_movel](http://www.pmach.com.br/informacoes-tecnicas/coluna_movel_x_centro_mesa_movel)>. Acesso em: 20 set. 2022.

POLIA e Correia. **Rolibras**, 2022. Disponível em: <<https://www.rolibras.com.br/polia-e-correia>>. Acesso em: 1 out. 2022.

POLIAS e Correias 1, 2022. Disponível em: <<https://essel.com.br/cursos/material/01/Manutencao/23manu2.pdf>>. Acesso em: 1 out. 2022.

QUARKS. QUARKS laser & plasma. **Linha CNC QP Pequeno Porte**, 26 jul. 2022. Disponível em: <<https://quarksautomacao.com/plasma-oxicorte-cnc/pequeno-porte/>>. Acesso em: 1 out. 2022.

RENANN G. BALDOVINO, J. P. R. M. S. A Pulse-Width Modulation (PWM) LASER Power Controller for the 3-Axis Computer Numerically-Controlled (CNC) LASER Machine. **7th IEEE International Conference Humanoid, Nanotechnology, Information Technology Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)**, 2013.

ROLLON. **Guia linear com gaiola de esferas**, ago. 2022. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/rollon/product-5182-42575.html>>. Acesso em: 1 out. 2022.

ROSA BRASIL. Guia Linear de Esferas, 2022. Disponível em: <<https://www.rosabrasil.com.br/guia-linear-esferas>>. Acesso em: 01 out. 2022.

SALOMÃO, R. **PROVÉRBIOS**. Jerusalém: [s.n.], 900AC.

SILVA, J. P. B. D. **Projeto e construção de uma Router CNC**. Recife. 2018.

SILVA, L. F. D.; MARCUS, T. **CNC Caseira Controlada por um Software Embarcado Open Source**. [S.l.]. 2022.

SINCAK, C. H.; DILDA, V.; LERMEN, R. T. Projeto, construção e funcionamento de uma máquina CNC com plataforma livre - arduino. **ResearchGate**, p. 70, 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. DRV8825. **Stepper Motor Controller IC**, ago. 2022. Disponível em: <[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf?ts=1659330118643&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf?ts=1659330118643&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)>. Acesso em: 12 out. 2022.

THORNTON, J. LinuxCNC G code Reference. **gnipsel**, 18 February 2022. Disponível em: <<https://gnipsel.com/linuxcnc/reference/page2.html>>. Acesso em: 1 out. 2022.

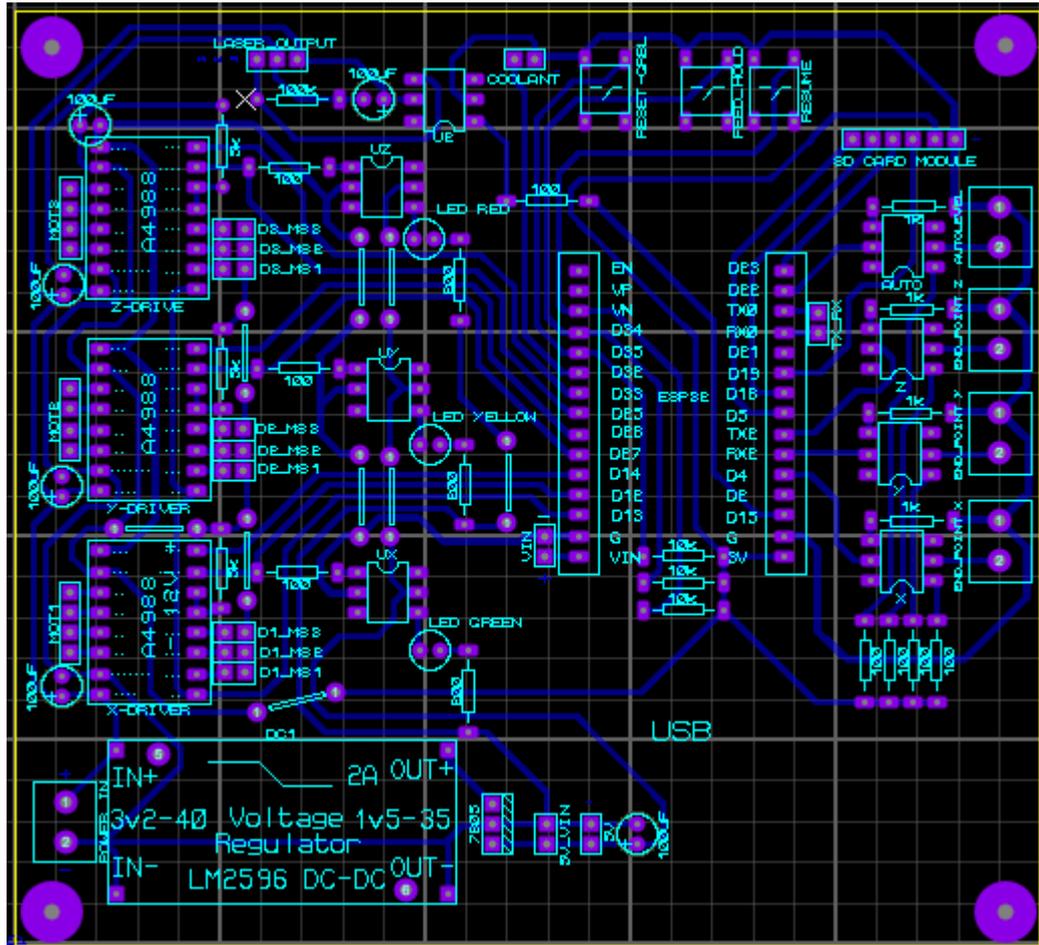
TMC2209\_PEN\_LASER. **GitHub**, 2022. Disponível em:  
<[https://github.com/bdring/TMC2209\\_Pen\\_Laser](https://github.com/bdring/TMC2209_Pen_Laser)>. Acesso em: 1 out. 2022.

VOIDMICRO. **LD3070LA Small and Extraordinary**, ago. 2022. Disponível em:  
<[http://voidmicro.com/Products/Laser/LD3070LA-en.html?page=page\\_laser](http://voidmicro.com/Products/Laser/LD3070LA-en.html?page=page_laser)>. Acesso em: 1 out. 2022.

## APÊNDICE A – PROJETO ELETRÔNICO DA PLACA DE CONTROLE

Segue a imagem do projeto eletrônico da placa de controle desenvolvida para esse trabalho na Figura 49. A Figura 50 mostra o mesmo projeto com comentários para que se possa identificar as partes que o compõe.

Figura 49 - Projeto Eletrônico da Placa de Controle desse trabalho



Fonte: Autor

