



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

DERIKS KARLAY DIAS COSTA

**PROTÓTIPO DE IMPRESSÃO DE PCI USANDO LASER, PARA PROTOTIPAGEM
EM LABORATÓRIO**

Tucuruí
2019

DERIKS KARLAY DIAS COSTA

**PROTÓTIPO DE IMPRESSÃO DE PCI USANDO LASER, PARA PROTOTIPAGEM
EM LABORATÓRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen
Coorientador: Prof. Me. Renato Luz Cavalcante

Tucuruí
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

C837p Costa, Deriks Karlay Dias
Protótipo de impressão de PCI usando laser, para
prototipagem em laboratório / Deriks Karlay Dias Costa. —
2019.
94 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen
Coorientador(a): Prof. Me. Renato Luz Cavalcante
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Computação Aplicada, Núcleo de Desenvolvimento
Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará,
Tucuruí, 2019.

1. Laser Direct Imaging. 2. Controle Numérico
Computadorizado. 3. Placa de Circuito Impresso. 4.
Fotopolimerização. 5. Ultravioleta. I. Título.

CDD 005.6

DERIKS KARLAY DIAS COSTA

**PROTÓTIPO DE IMPRESSÃO DE PCI USANDO LASER, PARA PROTOTIPAGEM
EM LABORATÓRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

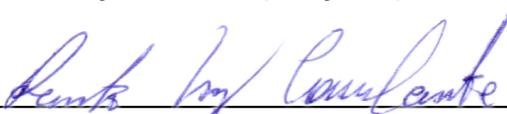
Orientador: Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen
Coorientador: Prof. Me. Renato Luz Cavalcante

Aprovada em 27 maio 2109.



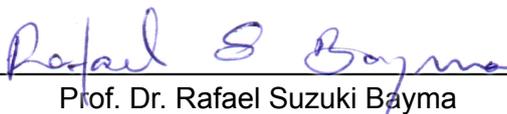
Prof. Dr. Ewerton Ramos Granhen

Programa de Pós Graduação em Computação Aplicada - UFPA - Orientador



Prof. Me. Renato Luz Cavalcante

UFPA Campus Tucuruí - Coorientador



Prof. Dr. Rafael Suzuki Bayma

Programa de Pós Graduação em Computação Aplicada - UFPA - Membro Interno



Prof. Dr. Marcos Benedito Caldas Costa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFPA - Membro Externo

Gostaria de dedicar esse trabalho a Deus por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis , por ser tão presente e essencial em minha vida, o autor do meu destino, meu guia que nunca me abandonou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Antônia do Socorro Dias Costa, uma heroína que sempre lutou por mim e meus irmãos, me deu apoio e incentivo nas horas difíceis, e na hora do desânimo e cansaço me trouxe café.

Ao meu pai Luiz Carlos Rodrigues Costa, meu herói sem capa, meu amigo de discussões que apesar de todas as dificuldades, sempre ensinou para mim e meus irmãos o valor do trabalho, honra e honestidade.

RESUMO

Nas últimas duas décadas o Laser Direct Imaging (LDI) tem sido amplamente estudado apenas com o sistema de movimentação galvanométrico, com foco para a indústria. A qual, enfrenta desafios cada vez mais complexos, como a miniaturização dos componentes e alta densidade de interconexões dos circuitos. No entanto, em laboratórios de eletrônica, os desafios se resumem em prototipar uma placa de circuito impresso (PCI) com qualidade. Por esse motivo, este trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa para facilitar a transferência do desenho do circuito para a PCI. Visando auxiliar a prototipação de PCIs em laboratórios de eletrônica. Para esse propósito, foi estudada uma alternativa usando o LDI com o sistema de movimentação CNC (Controle Numérico Computadorizado) cartesiano de dois eixos. Para testar essa alternativa foi construído um protótipo para um estudo de caso exploratório, onde foram realizados ensaios para testes de capacidade e níveis de desempenho. Os testes foram baseados na norma da ABNT NBR IEC 62326-4-1, a qual, é responsável pela especificação detalhada de capacidade de PCIs. Os resultados conseguiram alcançar sob condições ideais a largura de mínima de 0,082 mm para a trilha e 0,120 mm para a separação entre as trilhas. Um bom resultado se comparado com a média da largura mínima das trilhas fabricadas pelas indústrias nacionais de PCIs, que é de 0,125 mm. Com os resultados obtidos com o protótipo, ficou claro que uso do LDI com um sistema de movimentação CNC cartesiano de dois eixos é eficaz para a transferência de imagens. Podendo auxiliar a prototipação e produção de PCIs em laboratórios de eletrônica.

Palavras-chave: *Laser Direct Imaging*. Controle Numérico Computadorizado. Placa de Circuito Impresso. Fotopolimerização. Ultravioleta.

ABSTRACT

In the last two decades the Laser Direct Imaging (LDI) has been extensively studied only with the galvanometric movement system, with focus for the industry. Which faces increasingly complex challenges such as the miniaturization of components and the high density of circuit interconnections. However, in electronics labs, the challenges come down to prototyping a quality printed circuit board (PCB). For this reason, this paper aims to present an alternative to facilitate the transfer of circuit design to PCB. Aiming to assist the prototyping of PCBs in electronics laboratories. For this purpose, an alternative was studied using the LDI with the Cartesian CNC (Computed Numerical Control) system of two axes. To test this alternative, a prototype was built for an exploratory case study, where tests were carried out to test capacities and performance levels. The tests were based on the ABNT NBR IEC 62326-4-1 standard, which is responsible for the detailed PCBs capability specification. The results were able to achieve under optimum conditions the minimum width of 0.082 mm for the track and 0.120 mm for the separation between the tracks. A good result compared to the average minimum width of the tracks manufactured by the national PCBs industries, which is 0.125 mm. With the results obtained with the prototype, it was clear that the use of the LDI with a two-axis Cartesian CNC drive system is effective for the transfer of images. It can support the prototyping and production of PCBs in electronics laboratories.

Key-words: Laser Direct Imaging. Computer Numerical Control. Printed Circuit Board. Photopolymerization. Ultraviolet.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema galvanométrico.	18
Figura 2 – Concepção básica.	19
Figura 3 – Rádio a válvula.	20
Figura 4 – Etapas do método de Paul Eisler.	21
Figura 5 – Constituição das placas de circuito impresso.	22
Figura 6 – Espectro eletromagnético.	24
Figura 7 – Profundidade de cura.	26
Figura 8 – Diferença de emissão de luz.	26
Figura 9 – LDI - Processo.	27
Figura 10 – Fotolitografia <i>versus</i> LDI.	28
Figura 11 – Coordenadas Absolutas.	29
Figura 12 – Coordenadas Incrementais.	30
Figura 13 – CNC cartesiano de 2 eixos.	31
Figura 14 – Sistemas de posicionamentos H-Frame e Core-XY.	31
Figura 15 – Montagens Core-XY.	32
Figura 16 – Montagem da correia.	34
Figura 17 – Peças impressas em impressora 3D.	35
Figura 18 – Estrutura do protótipo.	36
Figura 19 – Guias Lineares.	37
Figura 20 – Rolamentos LM8UU.	38
Figura 21 – Polias GT2.	39
Figura 22 – Correia dentada sincronizadora GT2.	40
Figura 23 – Motores Nema17.	41
Figura 24 – emphDriver DRV8825 - Pololu.	42
Figura 25 – Chave fim de curso óptica.	43
Figura 26 – Posição dos sensores ópticos.	43
Figura 27 – Diodo <i>Laser</i> 500 mW 405 nm e módulo de controle TTL.	45
Figura 28 – Local de montagem do <i>laser</i>	45
Figura 29 – Fonte de alimentação chaveada 12 V 10 A.	46
Figura 30 – Arduino Uno Rev3 e Arduino CNC Shield V3.	48
Figura 31 – Configuração de micropassos.	49
Figura 32 – Diagrama de montagem eletrônica.	50
Figura 33 – Funcionalidades dos pinos no Arduino Uno Rev3 usados pelo Grbl.	51
Figura 34 – Fluxo de funcionamento do Grbl.	52
Figura 35 – Habilitar a cinemática Core-XY.	53
Figura 36 – Habilitar o ciclo de <i>homing</i> Core-XY.	53
Figura 37 – Área útil de impressão.	56

Figura 38 – Configurações do LaserWeb.	58
Figura 39 – Delimitação do teste de capacidade.	59
Figura 40 – Desenho do traçado para testes.	60
Figura 41 – Capacidade do produto.	60
Figura 42 – Cupons Individuais de Ensaio (CIE).	61
Figura 43 – Sistema de varredura de linhas.	63
Figura 44 – Resultados do cupom individual de ensaio A.	64
Figura 45 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 1.	64
Figura 46 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 2	65
Figura 47 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 3.	65
Figura 48 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 4.	65
Figura 49 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 5.	65
Figura 50 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 6.	65
Figura 51 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 7.	66
Figura 52 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 8.	66
Figura 53 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 9.	66
Figura 54 – Resultados do cupom individual de ensaio B.	68
Figura 55 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 1.	68
Figura 56 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 2.	68
Figura 57 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 3.	69
Figura 58 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 4.	69
Figura 59 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 5.	69
Figura 60 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 6.	69
Figura 61 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 7.	69
Figura 62 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 8.	70
Figura 63 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 9.	70
Figura 64 – Superexposição <i>laser</i>	72
Figura 65 – Efeito <i>halo</i>	73
Figura 66 – Resultados do cupom individual de ensaio C.	74
Figura 67 – Resultado ensaio C - Teste de Aplicação.	74
Figura 68 – Problema de ajuste de compensação de linhas.	75
Figura 69 – Resultado ensaio C - Adaptador ESP12f.	77
Figura 70 – Problema de oscilação de linha na pré-carga de movimento.	80
Figura 71 – Problema de ajuste de compensação de linhas.	81
Figura 72 – Problema de efeito <i>halo</i>	81
Figura 73 – Cupons de ensaio.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Materiais isolantes e suas características.	23
Tabela 2 – Fontes de radiação UV e seus comprimentos de onda.	25
Tabela 3 – Tabela de configuração de micropassos do <i>driver</i> DRV8825.	49
Tabela 4 – Resultado do grau de capacidade do ensaio A.	66
Tabela 5 – Resultado do grau de capacidade do ensaio B.	70
Tabela 6 – Capacidade de PCI empresas brasileiras.	86
Tabela 7 – Configurações.	87
Tabela 8 – Códigos G (<i>General or preparatory</i>) pelo padrão ISO 1056:1975 . .	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões.
A	Ampere.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AC	Corrente Alternada.
CAD	Computer Aided Design (Desenho assistido por computador).
CAM	Computer Aided Manufacturing (Manufatura auxiliada por computador).
CI	Circuito Integrado.
CNC	Computer Numeric Control (Controle Numérico Computadorizado).
DC	Corrente contínua.
DPI	Dots Per Inch (Pontos Por Polegadas).
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory (Memória Somente Leitura Programável Apagável Eletricamente).
FIFO	First In, First Out (Primeiro a entrar é o primeiro a sair).
g	Gramas.
I2C	Inter-Integrated Circuit (Circuito Inter-integrado).
ICSP	In-Circuit Serial Programming (Programação Serial em Circuito).
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional).
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização).
kB	Quilobyte.
kHz	Quilohertz.
LED	Light Emitting Diode.
MHz	Megahertz.
MIT	Massachusetts Institute of Technology.
ml	Mililitro.

mm	Milímetros.
mW	Miliwatt.
NBR	Norma Brasileira.
NC	Numeric Control (Comando Numérico).
NDAE	Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia.
nm	Nanômetro.
Nm	Newton-metro.
PCB	Printed Circuit Board (Placa de circuito impresso).
PCI	Placa de Circuito Impresso.
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação de Largura de Pulso).
rpm	Rotação por minuto.
SMD	Surface Mount Devices (Dispositivos para montagem em superfície).
SPI	Serial Peripheral Interface (Interface Periférica Serial).
SRAM	Static Random-Access Memory (Memória de Acesso Aleatório Estática).
TTL	Transistor-Transistor Logic (Lógica Transistor-Transistor).
USB	Universal Serial Bus (Porta Universal).
UV	Ultravioleta.
V	Volt.
W	Watt.

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
°	Graus
γ	Gama
λ	Lambda
Ω	Ohm
ε	Épsilon

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Problema de pesquisa	17
1.2	Justificativas	17
1.3	Objetivo Geral	19
1.3.1	Objetivos Específicos	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Evolução da Placa de Circuito impresso	20
2.1.1	Constituição	22
2.2	Materiais Fotossensíveis	23
2.2.1	Fotopolimerização	24
2.2.2	Mecanismo de fotopolimerização por UV	24
2.3	<i>Laser</i>	26
2.4	<i>Laser Direct Imaging</i>	27
2.5	Controle Numérico Computadorizado	28
2.5.1	Sistema de movimentação	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Projeto Mecânico	33
3.1.1	Desenho do protótipo	33
3.1.2	Guias Lineares	36
3.1.3	Rolamentos Lineares	37
3.1.4	Polias	38
3.1.5	Correias	39
3.2	Projeto Elétrico	40
3.2.1	Motores de passo	40
3.2.2	<i>Drivers</i> de potência	41
3.2.3	Chave fim de curso	42
3.2.4	Diodo <i>Laser</i>	44
3.2.5	Fonte de alimentação	46
3.3	<i>Hardware e Software</i>	47
3.3.1	<i>Hardware</i>	47
3.3.2	<i>Firmware</i>	50
3.3.2.1	Configurações do Grbl	53
3.3.3	<i>Software</i>	57
3.4	Teste de capacidade	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63

5	CONCLUSÃO	78
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	79
5.1.1	Diminuição da oscilação de linha na pré-carga de movimento.	80
5.1.2	Ajuste de compensação de linhas	80
5.1.3	Eliminar o efeito <i>halo</i>	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A – CAPABILIDADE DE EMPRESAS BRASILEIRAS . . .	86
	APÊNDICE B – CONFIGURAÇÕES DO GRBL	87
	APÊNDICE C – CUPONS INDIVIDUAIS DE ENSAIO	89
	ANEXO A – CÓDIGOS G PADRÃO ISO 1056:1975	90
	ANEXO B – CÓDIGOS G SUPORTADOS NO GRBL V1.1X	93

1 INTRODUÇÃO

A Placa de Circuito Impresso (PCI) é um elemento presente na maioria dos produtos eletrônicos (CAMILO *et al.*, 2015; BARBUCHA; MIZERACZYK, 2016). O mercado global está exigindo circuitos cada vez mais complexos e com maior número de componentes, surgindo assim a necessidade de reduzir a largura dos condutores (pistas) para permitir interligar componentes cada vez menores (ALBIN; BARCLAY, 2003; SOARES, 2011; ALWAIHDH; SHARP; FRENCH, 2014; KUO; HUANG, 2016; DUPONT *et al.*, 2018). Essas mudanças têm um impacto significativo sobre o processo de produção de PCIs.

Durante a década de 2010, a largura média¹ das pistas nas PCIs convencionais passou de 0,2 mm para 0,1 mm (BARBUCHA *et al.*, 2007a; BARBUCHA *et al.*, 2007b). A fotolitografia é um processo muito eficiente, geralmente utilizado na produção de PCIs para a expor o desenho dos circuitos. No entanto, esse processo tem uma capacidade limitada para produzir pistas e espaços entre as pistas com larguras abaixo de 0,15 mm (BARBUCHA *et al.*, 2008). Essa limitação está intrinsecamente relacionada a capacidade de impressão do fotolito ou máscara.

Para superar essa limitação a tecnologia a *laser* vem se tornando um padrão para a produção de PCIs com alta densidade de interconexões (MEIER; SCHMIDT, 2002). O *Laser Direct Imaging* (LDI) é um processo de criação de imagem direta a *laser*, ou seja, não utiliza fotolito ou máscara. A tecnologia do LDI requer uma PCI com sua superfície revestida com um material fotossensível, posicionada sob um *laser* controlado por computador, portanto, a superfície fotossensível é exposta por um feixe de *laser* focado que usa um sistema galvanométrico para transferir a imagem através de varredura de linhas. O *laser* frequentemente usado neste processo está dentro da região do espectro UV (ultravioleta), uma vez que este tende a se adequar à maioria dos materiais fotossensíveis disponíveis.

Contudo, a tecnologia do LDI tem sido amplamente estudada com sistemas galvanométricos (BARBUCHA *et al.*, 2005; NOWAK *et al.*, 2013). O que se justifica pelo fato do sistema ser baseado em espelhos móveis, dinâmicos e de baixa inércia, por praticamente não haver aceleração de massas, o feixe de *laser* pode assim ser guiado sobre a placa a velocidades elevadas, com alta precisão e repetibilidade. Sendo introduzido na indústria de PCI em 2004 (STARKEY, 2004; BARBUCHA; MIZERACZYK, 2016).

No entanto, a tecnologia do LDI não está vinculada a um sistema de movimentação para o feixe de *laser*, o que a torna um processo flexível para ser implementado em outros sistemas. O sistema galvanométrico pode realizar a transferência de imagens em poucos segundos, sendo ideal para os requisitos

¹ A largura mínima da trilha depende do processo de fabricação utilizado. Os valores citados são usuais nos prestadores de serviço de confecção de placas disponíveis no Brasil (ver Apêndice A).

enfrentados pela indústria. Fora do eixo industrial o LDI pode ser usado com outros sistemas de movimentação, onde a velocidade não é um fator determinante.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa para facilitar a transferência do desenho do circuito para a PCI, auxiliando a sua produção, fazendo uso de duas tecnologias distintas: CNC (Controle Numérico Computadorizado) e o LDI. Para investigar essa alternativa foi construído um protótipo para um estudo de caso exploratório. Onde foi investigado a eficiência do LDI usando um sistema CNC cartesiano de dois eixos para posicionar o feixe de *laser*. Ao final da pesquisa exploratória, foram realizados ensaios para testes de capacidade e níveis de desempenho de acordo com a norma NBR IEC 62326-4-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007c). Os testes foram delimitados apenas a largura e espaçamento das pistas, os resultados podem servir como ponto de referência para futuros estudos na utilização do LDI com outros sistemas de movimentação para o *laser*.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, no primeiro capítulo são abordados o problema de pesquisa, justificativas e a definição dos objetivos. No segundo, toda a fundamentação teórica é apresentada para a melhor compreensão dos elementos presentes nessa pesquisa. No terceiro capítulo, é apresentado os materiais e métodos utilizados para o estudo de caso exploratório. Onde é descrito a construção do protótipo e como foi realizado os testes. No quarto capítulo, é apresentado os resultados dos ensaios e suas discussões. O quinto capítulo, apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Problema de pesquisa

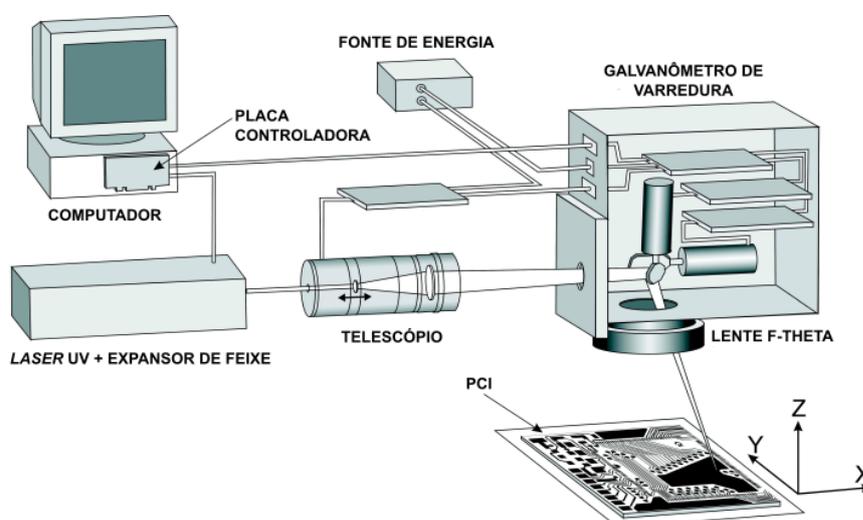
Nas últimas duas décadas o LDI tornou-se uma tecnologia bem estabelecida para expor imagens diretamente sobre a PCI utilizando um feixe de *laser*. Apesar de existirem diferentes sistemas para direcionar o feixe de *laser*, a técnica do LDI tem sido amplamente estudada apenas com o sistema de movimentação galvanométrico (BARBUCHA *et al.*, 2005; NOWAK *et al.*, 2013). O que levanta uma questão: ***Como testar a eficiência e a qualidade de uso, do LDI com um sistema de movimentação CNC cartesiano no processo de produção de PCI?***

1.2 Justificativas

A crescente demanda para a miniaturização e alta densidade de interconexões (pistas) têm um efeito significativo sobre os requisitos enfrentados pela indústria de placa de circuito impresso (ALBIN; BARCLAY, 2003; SOARES, 2011; ALWALIDH; SHARP; FRENCH, 2014; KUO; HUANG, 2016; DUPONT *et al.*, 2018). A tecnologia LDI é considerada uma resposta para estes requisitos (MEIER; SCHMIDT,

2002; BARBUCHA *et al.*, 2007b; BARBUCHA *et al.*, 2008). Na indústria as máquinas de LDI fazem uso de sistemas galvanométricos para posicionar o feixe de *laser* e uma lente F-Theta para a focalizar (Figura 1). Nas últimas duas décadas os estudos sobre o LDI foram focados para atender os requisitos enfrentados pelas indústrias (BARBUCHA *et al.*, 2005; NOWAK *et al.*, 2013). Em laboratórios de eletrônica, os requisitos se resumem em prototipar uma PCI com qualidade, essa qualidade pode ser obtida fazendo uso do LDI com sistemas menos complexos que o galvanométrico. Para esse foco, surge a necessidade de investigar outras alternativas para posicionamento do *laser* no uso do LDI.

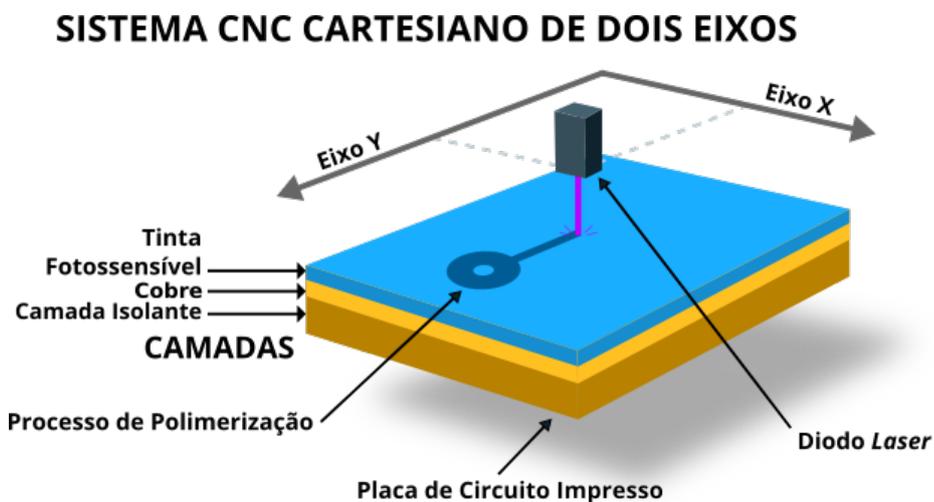
Figura 1 – Sistema galvanométrico.



Fonte: Adaptada de Barbuca et al. (2007, p. 4).

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa para facilitar a transferência do desenho do circuito para a PCI, auxiliando a sua produção, fazendo uso de duas tecnologias distintas como o CNC e o LDI (Figura 2). Foi construído um protótipo para investigar a eficiência do LDI usando um sistema CNC cartesiano de dois eixos para posicionar o feixe de *laser*. Ao final foram realizados ensaios para testes de capacidade e níveis de desempenho de acordo com a norma da ABNT NBR IEC 62326-4-1.

Figura 2 – Concepção básica.



Os resultados dessa pesquisa tem como foco beneficiar as instituições de ensino e laboratórios de eletrônica, com o objetivo de melhorar a qualidade de ensino e capacitação. Visando incentivar inovações tecnológicas, facilitando a transição de modelos teóricos para práticos, aumentando a qualificação dos alunos em áreas de tecnologia. Contribuindo para pesquisas em projetos eletrônicos, aumentando a qualidade de prototipação de uma ampla gama de hardware.

1.3 Objetivo Geral

Projetar e construir um protótipo de uma máquina CNC cartesiana de dois eixos, para testar a técnica do LDI no processo de produção de PCI. Verificar a qualidade e repetibilidade dos resultados de acordo com a norma da ABNT NBR IEC 62326-4-1. Visando apresentar uma alternativa para prototipação rápida de PCI.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Investigar o processo de fotopolimerização para determinar a potência e o comprimento de onda do *laser*.
- Investigar os sistemas de movimentação cartesianos de dois eixos para determinar o mais adequado para o LDI.
- Determinar a largura mínima da pista metalizada na camada externa da PCI.
- Determinar a separação mínima entre as pistas metalizadas na camada externa da PCI.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para fundamentação dos métodos e técnicas utilizadas neste trabalho foram realizadas pesquisas em várias fontes, tais como livros, artigos científicos e pesquisa de bases conceituais, com diversas vertentes. Neste capítulo serão abordados o conceito de PCI e sua constituição, os materiais fotossensíveis e o processo de fotopolimerização. A fonte de luz emitida pelo *laser* e sua utilização no LDI, assim como, o conceito do CNC e seus sistemas de movimentação.

2.1 Evolução da Placa de Circuito impresso

Antes do advento dos transistores os circuitos eletrônicos tinham como base as válvulas a vácuo, as mesmas eram relativamente grandes, suas ligações dispensavam o uso de pistas devido a sua facilidade e simplicidade de montagem (SOARES, 2011). A Figura 3 mostra um antigo rádio a válvula, onde se observa como era feita a interligação entre os componentes.

Figura 3 – Rádio a válvula.



Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1920s_TRF_radio_manufactured_by_Signal.jpg.

Gilleo e Murray (1999) relata que no início do século XIX as indústrias de telecomunicações estavam em expansão, surgindo assim a necessidade de produzir circuitos eletrônicos em massa. Como as ligações elétricas dos componentes eram efetuadas manualmente, a indústria passou a necessitar de uma alternativa diante da complexidade dos circuitos. O alemão Albert Hanson surge com o conceito de circuito impresso em 1903, registrando sua patente na Inglaterra, seu método consistia em cortar tiras de uma folha de cobre ou bronze, separadas por papel parafinado. Embora seu método não consista em impressão, ele serviu como

referência para as placas atuais, produzindo padrões de caminhos condutores de metal separados por um dielétrico de papel.

Ao longo do tempo outras ideias foram surgindo, Thomas Edison sugeriu um método que consistia em pintar o desenho do circuito com uma cola, em seguida acrescentando um pó condutor de grafite sobre a cola para endurecer. Os primeiros conceitos de placas de circuito impresso baseavam-se no processo aditivo, ou seja, depositando materiais condutores sobre o material isolante. Em 1913 Arthur Berry patenteia um método subtrativo, fazendo a corrosão do material condutor, aplicando uma resina com o desenho do circuito sobre uma folha de metal, antes da corrosão. Em 1936 o engenheiro austríaco chamado Paul Eisler desenvolveu um conceito similar a uma placa de circuito impresso atual de face simples. Paul Eisler patenteou um método para corroer uma folha de cobre depositada sobre um material isolante, aperfeiçoando o processo subtrativo (EISLER, 1989).

O método de Paul Eisler para confecção de placas de circuito impresso é utilizado até os dias atuais, baseado na fotogravura. O processo consiste em cobrir toda a superfície de cobre da placa com uma tinta sensível à luz e resistente a corrosão (*coat resist*). Sobrepor o desenho em negativo a superfície da placa e submeter à luz durante um determinado período (*image*). Fazer a remoção das áreas não sensibilizadas à luz em uma solução removedora ficando apenas a imagem revelada (máscara) na superfície da placa (*develop*). Mergulhar a placa em uma solução ácida para a remoção do cobre das áreas que não foram protegidas pela máscara (*etch*). Após a remoção do cobre, será removido a máscara com outra solução removedora para a finalização do processo (*strip resist*). A figura 4 mostra as etapas do processo.

Figura 4 – Etapas do método de Paul Eisler.



Fonte: Adaptada de Gilileo e Murray (1999, p. 11)

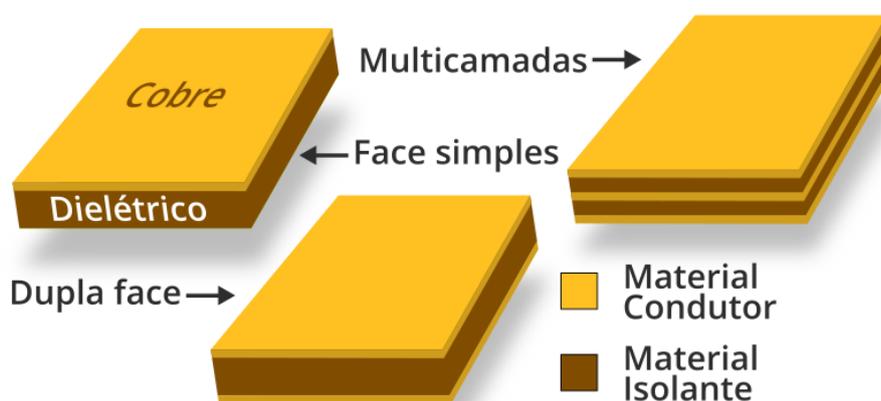
Segundo Gilileo e Murray (1999) a origem do circuito impresso não pode ser atribuído a uma só pessoa, muitos inventores deram as suas contribuições ao longo da história, o conjunto dessas contribuições deram origem ao seu conceito final. As placas de circuito impresso estão em constante evolução, essas evoluções são muito dinâmicas, seja no seu processo de fabricação, quanto na utilização de materiais condutores ou isolantes. A título de curiosidade, o físico Philip Russel Wallac em 1947 descobriu o material condutor mais fino do mundo, esse material é um cristal bidimensional formado por ligações entre átomos de carbono, com uma aparência hexagonal (GEIM; NOVOSELOV, 2007). Esse material é conhecido como grafeno e suas propriedades apresentam uma excelente resistência mecânica, sendo considerado

mais resistente que aço e diamante. Possui alta condutividade térmica e elétrica, sendo melhor condutor elétrico que o cobre e o silício metálico (SILVA, 2013). Em 2004 as propriedades desse material passaram a ser estudadas e divulgadas pelos cientistas Andre Geim e Konstantin Novoselov, da Universidade de Manchester, recebendo o Prêmio Nobel de Física de 2010.

2.1.1 Constituição

A placa de circuito impresso é constituída por uma ou mais camadas de materiais condutores separados por um material isolante, chamado de dielétrico. O dielétrico não só separa as diferentes camadas nos circuitos, como fornece a estrutura para o próprio circuito e para os componentes. Diversos materiais podem ser utilizados como condutor elétrico ou isolante de acordo com a aplicação pretendida (SOARES, 2011). A Figura 5 mostra a constituição das três principais PCI.

Figura 5 – Constituição das placas de circuito impresso.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um dos materiais mais utilizados na formação de condutores elétricos em placas de circuito impresso é o cobre. O cobre tem a segunda maior condutividade elétrica, perdendo apenas para a prata. Outros materiais podem ser utilizados como a liga de estanho e o ouro (FALCÃO, 2014). Resalta-se que na camada de isolamento entre os condutores elétricos, o material frequentemente utilizado é o FR-4, contudo, na maior parte dos casos as características do material isolante é que determina as propriedades finais das placas. Essas propriedades se dão ao nível de flexibilidade, temperatura suportada, dissipação térmica, resistência a vibrações, impactos, ataques químicos, entre outras. A Tabela 1 apresenta alguns materiais isolantes mais usuais e suas características.

Tabela 1 – Materiais isolantes e suas características.

Classe	Composição	Propriedades Gerais	Aplicações Típicas
CEM-1	Resina Epóxi, Fibra de vidro (na superfície) e Papel (no interior). Conhecida como Composite.	<ul style="list-style-type: none"> – Estampável à frio. – Propriedades elétricas e físicas melhores que os laminados com papel. 	<ul style="list-style-type: none"> – Equipamentos eletrônicos em geral. – Indústria automotiva. – Rádio e TV.
CEM-3	Resina Epóxi e Fibra de vidro não trançada.	<ul style="list-style-type: none"> – Estampável, porém, mais duro que o CEM-1 – Propriedades elétricas e físicas intermediárias entre o CEM-1 e o FR-4 	<ul style="list-style-type: none"> – Equipamentos eletrônicos em geral. – Indústria automotiva. – Informática. – Telecomunicações.
FR-1 FR-2	Resina fenólica e Papel conhecida como “Fenolite”.	<ul style="list-style-type: none"> – Estampável à frio. – Absorção de umidade. – Fragilidade mecânica. 	<ul style="list-style-type: none"> – Equipamentos de uso geral / Entretenimento.
FR-4	Resina epóxi e Tecido de fibra de vidro.	<ul style="list-style-type: none"> – Alta resistência à flexão, calor e umidade. – Não absorve água. – Alta resistência mecânica. 	<ul style="list-style-type: none"> – Indústria automotiva. – Equipamentos eletrônicos em geral. – Equipamentos de alta confiabilidade.

Fonte: Adaptada de <https://www.micropress.com.br/comparacao-de-laminados>.

2.2 Materiais Fotossensíveis

Segundo Rodrigues e Neumann (2003) a Fotoquímica constitui uma área de pesquisa multidisciplinar que está tendo um grande desenvolvimento tanto ao nível acadêmico como industrial.

No âmbito industrial a Fotoquímica de Polímeros é uma das áreas que está em constante desenvolvimento, devido ao grande número de novas aplicações como também do ponto de vista econômico, técnico e ecológico. As aplicações da Fotoquímica de Polímeros podem ser divididas em três grandes grupos:

- 1) Reações de Síntese (CATALINA; MARTINEZ-UTRILLA; SASTRE, 1982)(HODGE; SHERRINGTON, 1980).
- 2) Fotodegradação/Fotoestabilização (RANBY; RABEK, 1975)(CATALINA; ALLEN; CHIRINOS-PADRON, 1991).
- 3) Processos de Fotopolimerização/Fotocura (ALLEN, 1989)(PAPPAS, 1978).

O setor de fotopolimerização/fotocura tem recebido atenção especial devido a inúmeras e importantes aplicações na área de materiais, como por exemplo:

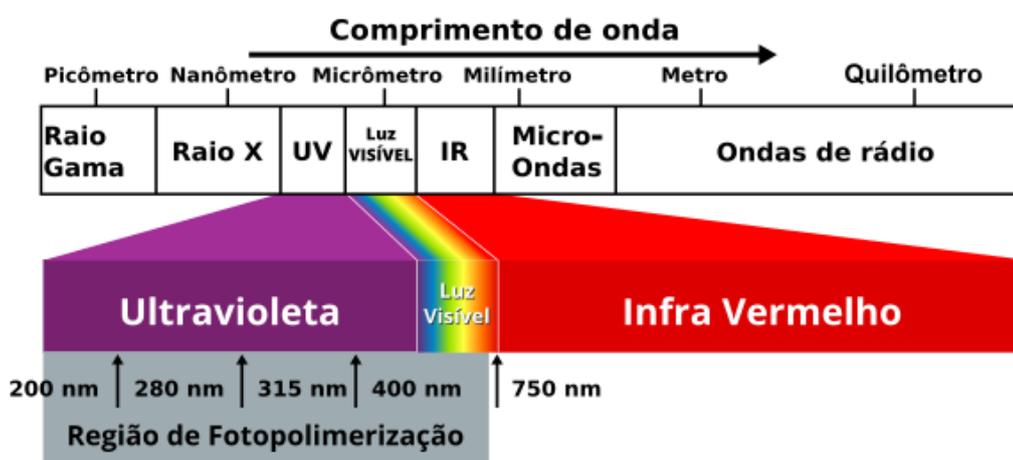
- Artes Gráficas. Uso de tintas, vernizes e adesivos de fotosssecagem rápida (DIETLIKER, 1991)(ALLEN *et al.*, 1995).
- Eletricidade e Eletrônica. O exemplo mais conhecido é a fabricação de circuitos impressos, embora outras aplicações como a fotoestereolitografia estejam sendo cada vez mais usadas (BÖTTCHER, 1991)(TIMPE; RAJENDRAN, 1991).

2.2.1 Fotopolimerização

Quando os raios de luz encontram um composto, a luz pode ser transmitida, absorvida ou refletida. Alguns compostos podem absorver certos fótons (pacote de energia), mas podem ser completamente transparentes a outros. No entanto, uma mudança química pode ocorrer simplesmente pela absorção de fótons gerando a polimerização. Fazendo a conversão de substratos de baixa massa molecular (geralmente no estado líquido) em polímeros (macromoléculas sólidas de alta massa molecular) (HUGGINS, 1954).

Apesar de a luz emitir radiações em várias faixas de frequência, como raio-X, raios- γ e micro-ondas, podendo induzir reações de polimerização. A fotopolimerização trata apenas daquelas que são induzidas por luz na região do UV até próximo do Infravermelho (FOUASSIER, 1995). A Figura 6 ilustra a região de fotopolimerização.

Figura 6 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.2 Mecanismo de fotopolimerização por UV

Segundo Paoli (2009), reações fotoquímicas se dão quando há a absorção de luz na faixa de comprimento de onda que vão da UV a luz visível ou pela energia liberada em reações químicas. Assim, a incidência de luz sobre um polímero pode provocar um estado excitado para que ocorra a reação fotoquímica.

Um ponto importante para o processo de fotopolimerização são os fotoiniciadores que são substâncias orgânicas, ou mistura de substâncias orgânicas. Eles absorvem a luz para produzir espécies ativas que irão reagir com os monômeros ou oligômeros (líquidos reativos) à sua volta, iniciando as reações de polimerização (HUGGINS, 1954). Gaspar (2006) relata que no caso dos fotoiniciadores, os fótons são absorvidos em quantidades discretas. Planck demonstrou que a energia absorvida/emitida é dada pela Equação 2.1:

$$E = hc \cdot \lambda^{-1} \quad (2.1)$$

Onde:

E = Energia do fótons, também conhecida como quantum.

h = Constante de Planck.

c = Velocidade da luz.

λ = Comprimento de onda da fonte emissora.

A Equação 2.1 mostra que existe uma relação inversa entre o comprimento de onda da radiação e a energia do fóton. Quanto maior for o comprimento de onda menor é a energia do fóton.

Tabela 2 – Fontes de radiação UV e seus comprimentos de onda.

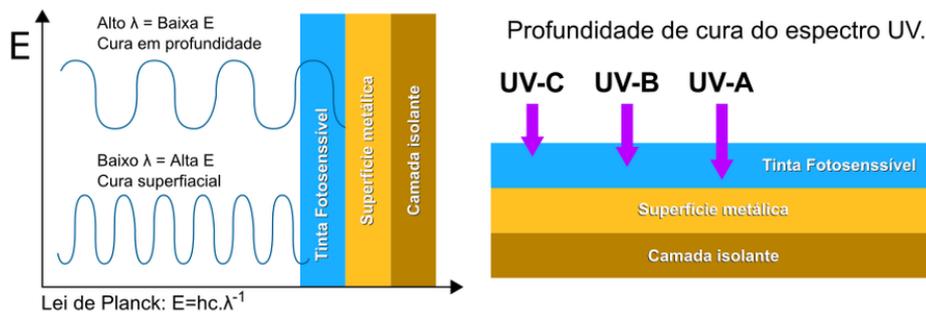
Fonte de luz UV	Comprimento de onda (λ)
UV-V	400 – 450 nm
UV-A	315 – 400 nm
UV-B	280 – 315 nm
UV-C	200 – 280 nm

Fonte: Retirada de Gaspar (2006, p. 61)

Como observado na Tabela 2, tomando como base a equação de Planck é possível deduzir que a energia do fóton da luz UV-V é menor que a energia do fóton da luz UV-C.

Souza e Volpato (2015) relata que a profundidade de cura está diretamente ligada ao comprimento de onda da fonte emissora e não a sua energia. Quanto maior o comprimento de onda dentro do espectro UV mais profundo será a cura. A Figura 7 ilustra a profundidade de cura com relação à Lei de Planck.

Figura 7 – Profundidade de cura.



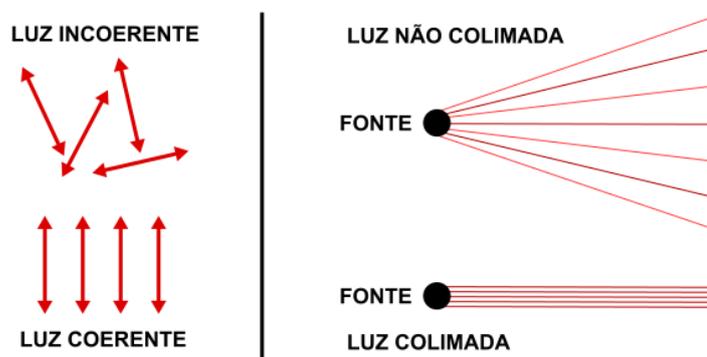
Fonte: Adaptada de Souza e Volpato (2015, p. 13)

2.3 Laser

A palavra *LASER* é um acrônimo *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa amplificação de luz por emissão estimulada de radiação. A luz emitida por um *laser* não existe na natureza e apenas pode ser criada pelo homem (GOULD, 1959).

Segundo Soares (2011) a luz emitida pelo sol, é constituída por diversos comprimentos de ondas (cores) resultando na luz branca. A luz emitida por um *laser* difere da luz comum, devido ao fato do *laser* apenas emitir um comprimento de onda. Assim, a luz de um *laser* é monocromática, ou seja, possui uma só cor. Outro aspecto importante, é que todas as ondas emitidas pelo *laser* estão em fase, logo a luz de um *laser* é coerente. Diferente de outras fontes de luz existentes como o sol ou as lâmpadas que emitem sua luz em várias direções. A luz do *laser* é colimada é viaja na mesma direção, seguindo um trajeto paralelo, o que se traduz num feixe capaz de ser concentrado em um único ponto. A Figura 8 mostra essas diferenças.

Figura 8 – Diferença de emissão de luz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo fato de a luz emitida por um *laser* ser monocromática, coerente e colimada, toda a energia pode ser focada para produzir altas concentrações em um único ponto.

Este nível de concentração de energia possibilita a realização de diversas operações com bastante precisão para desenho e impressão, sendo muito utilizado em diversas aplicações na indústria (GAN; ZHENG; LIM, 2000).

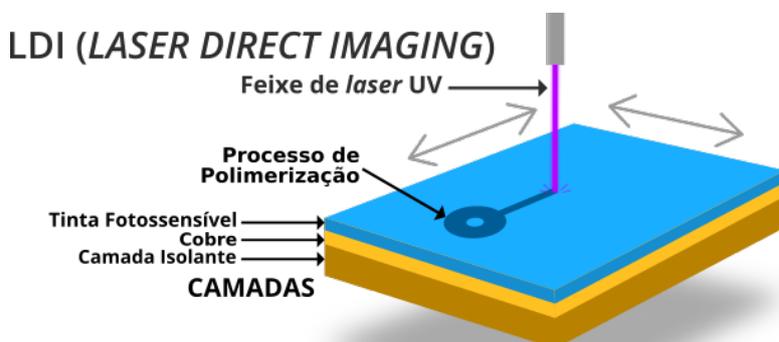
2.4 Laser Direct Imaging

Durante a década de 1960 um cientista Austríaco chamado Heinz Joe Gerber desenvolveu e apresentou ao mundo a primeira *photoplotter* NC (Controle Numérico) usada para produzir PCI, Gerber chamou sua invenção de “X-Y *plotter*” o que lhe rendeu uma patente em 1969 (GERBER; LOGAN,). Em 1965 Gerber aprimora sua máquina para usar uma fonte de luz montada em uma roda rotativa com varias aberturas para expor um filme fotográfico monocromático. A fonte de luz era movimentada por uma mesa digital que usava coordenadas XY para posicionamento, a luz era ligada e desligada conforme sua posição, assim gerando o desenho para ser exposto ao filme fotográfico (JOSEPH; WEBSTER,). Desta maneira Gerber criou o conceito de fotoplotagem, além de criar o formato de arquivo *Gerber*, esse formato acabou se tornando o padrão de transferência de dados de imagem para PCI.

As fotoplotters modernas usam um feixe de *laser* focalizado como fonte de luz e fazem a transferência da imagem usando um sistema raster-scan (varreduras de linhas) (SCHROEDER, 1998). O desenvolvimento mais recente dessa tecnologia deu origem ao conceito do LDI, porém, apenas na década de 2000 as primeiras máquinas de LDI começaram a ser comercializadas . A empresa Orbotech foi a pioneira com sua máquina Paragon 9000 (STARKEY, 2004; BARBUCHA; MIZERACZYK, 2016).

O LDI é uma técnica que usa um feixe de *laser* focalizado para exposição direta do desenho de um circuito para a PCI, geralmente revestida com material fotossensível. Essa técnica elimina a utilização de exposição por sistemas fotográficos (fotolitografia) (BARBUCHA *et al.*, 2008). A Figura 9 demonstra o processo.

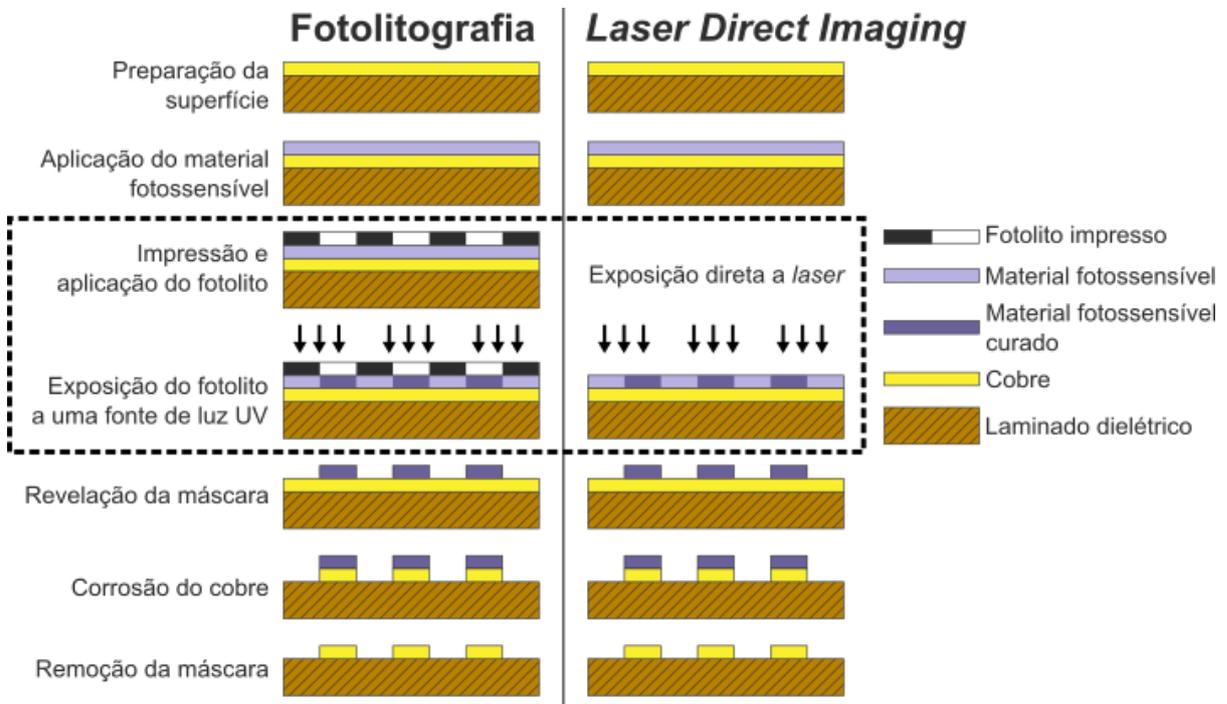
Figura 9 – LDI - Processo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vantagem da tecnologia do LDI é a redução de etapas no processo de produção da PCI. A Figura 10 ilustra as diferenças entre o método fotográfico e a tecnologia LDI.

Figura 10 – Fotolitografia *versus* LDI.



Fonte: Adaptada de Barbucha e Mizeraczyk (2016, p. 2)

O LDI é uma tecnologia utilizada apenas na etapa de transferência da imagem, e não atua nas outras etapas para produção da PCI. No entanto, quando uma PCI é produzida, o processo de transferência de imagens é o que define a qualidade das pistas do circuito (CHAVAN *et al.*, 2016). Enquanto o processo tradicional requer uma ferramenta de impressão fotográfica e luz UV para expor as imagens. O LDI usa apenas uma técnica de varredura de linhas com *laser* para expor diretamente o desenho do circuito na placa, conseguindo superar as limitações tradicionais de impressão.

2.5 Controle Numérico Computadorizado

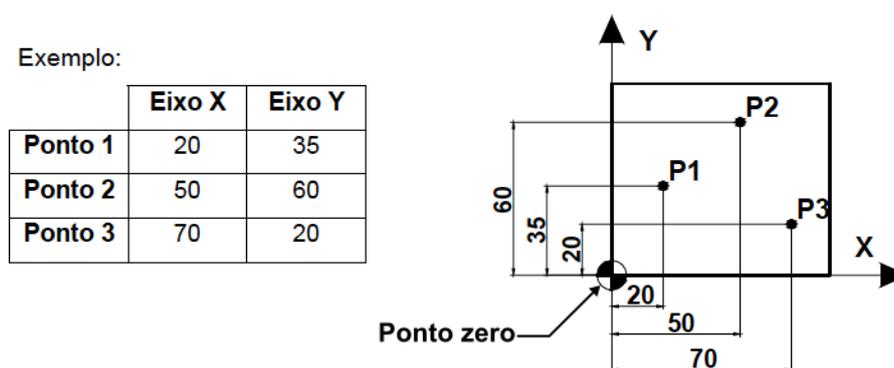
No início da década de 80, os sistemas computadorizados chegaram as indústrias, com isso foi possível desenvolver uma tecnologia para integrar o controle numérico a um sistema de processamento com interface gráfica (CAD/CAM) criando uma solução mais rápida para modificar esses comandos (MACHADO, 1990). Essa tecnologia foi denominada como Controle Numérico Computadorizado (CNC) e a sua introdução teve um impacto significativo nos processos industriais. O CNC está sendo atualmente usado para diversas operações, tais como, usinagem, corte, solda, impressão 3D, entre outras.

Lacerda, Balduino Filho e Siqueira (2005) relata que o emprego de máquinas CNC em processos de fabricação teve o objetivo inicial de buscar soluções que fornecessem um aumento de produtividade e qualidade. Diante das exigências do mercado consumidor, surge também a necessidade de maior flexibilidade para esses equipamentos, tornando possível a fabricação de poucas unidades com características dimensionais diferenciadas, além de geometrias complexas.

Muitos processos podem ser automatizados com CNC, por ter um sistema de movimentação baseado em coordenadas cartesianas referentes à sua trajetória que podem ser descritas em dois tipos (SOUZA; ULBRICH, 2009):

- 1) Coordenadas Absolutas (Figura 11): Um ponto qualquer estará sempre corretamente definido no sistema, através de um par de coordenadas, podendo ser definido como o ponto zero ou ponto de origem.

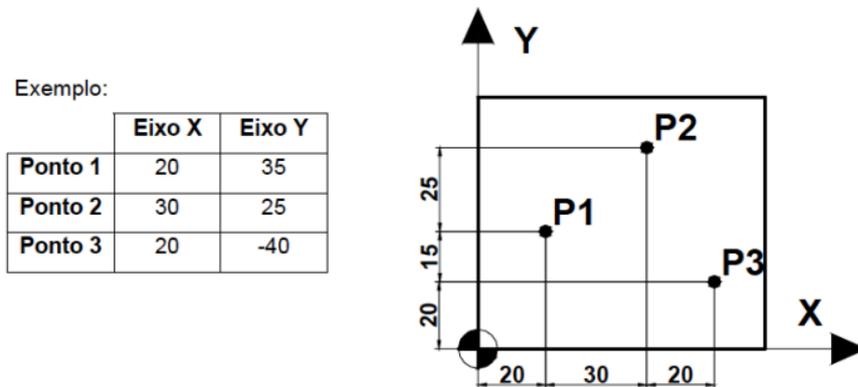
Figura 11 – Coordenadas Absolutas.



Fonte: <https://rainhavermelhacet.wordpress.com/2017/04/17/programacao-cnc-comando-numerico-computadorizado/>.

- 2) Coordenadas Incrementais (Figura 12): Neste sistema, a localização de um ponto qualquer não é definida em relação à origem, sendo o ponto zero o último que a ferramenta esteve.

Figura 12 – Coordenadas Incrementais.



Fonte: <https://rainhavermelhacet.wordpress.com/2017/04/17/programacao-cnc-comando-numerico-computadorizado/>

O CNC usa um método de programação muito flexível que são descritos por valores numéricos formando um conjunto de dados referentes a sua trajetória dentro de coordenadas cartesianas. Além destes dados de trajetória é possível determinar outras funções, podendo estas serem personalizadas de acordo com cada aplicação, dando flexibilidade para cada fabricante. Esses comandos são chamados de instruções de código G (G-Code) e são enviados de forma sequencial para serem interpretados e executados pela máquina (SOUZA; ULBRICH, 2009).

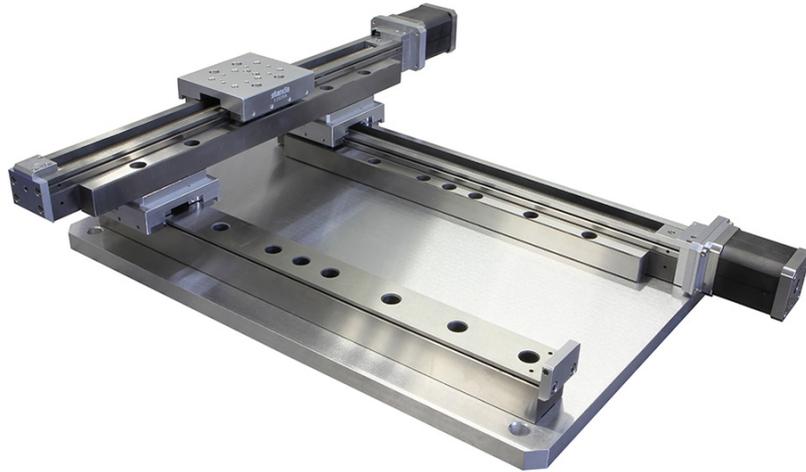
O padrão mais comum de instruções é baseado na norma ISO 1056:1975 (Anexo A) criada para uso geral, mas mantendo uma flexibilidade para se adaptar a diferentes aplicações. Cada fabricante pode implementar suas funções de acordo com a especificidade de cada solução, esta flexibilidade acaba tornando muitas implementações distintas e proprietárias para cada fabricante (PEREIRA, 2003).

2.5.1 Sistema de movimentação

Segundo Sollmann, Jouaneh e Lavender (2010), os sistemas de posicionamento cartesianos de dois eixos são amplamente utilizados na indústria para posicionar uma peça ou uma ferramenta dentro de uma área retangular bidimensional. Estes sistemas são normalmente utilizados para corte, soldagem, marcação ou para aplicações que necessitem movimentar uma variedade de produtos.

As implementações mais usuais dos sistemas de posicionamento de dois eixos normalmente consistem em duas guias lineares. Cada guia com a sua própria correia de sincronização independente, ou fuso de esfera acoplado a um motor (ITOH; IWASAKI; MATSUI, 2004; DOUGANS, 1985). As guias lineares são montadas sobrepostas entre si e posicionadas de forma perpendicular como mostra a Figura 13.

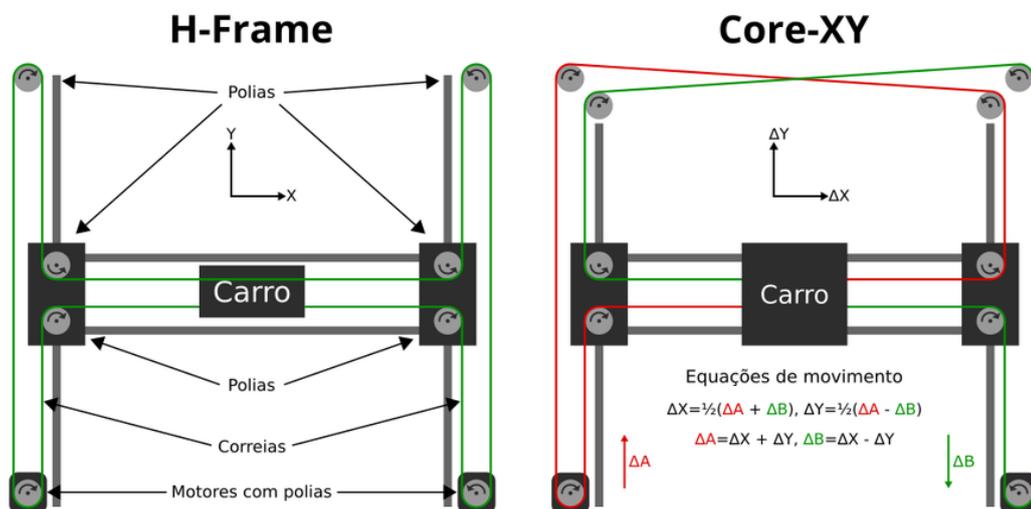
Figura 13 – CNC cartesiano de 2 eixos.



Fonte: http://www.standa.lt/products/catalog/vacuum_compatible_stages?item=605.

Embora essas configurações de posicionamento sejam amplamente utilizadas, as mesmas tendem a ser volumosas e pesadas, não sendo muito adequadas para projetos com baixo volume e alta velocidade. Atualmente existem vários sistemas de posicionamento de dois eixos leves e compactos, um deles é o H-Frame (SOLLMANN; JOUANEH; LAVENDER, 2010). Esse sistema consiste em duas guias lineares que são paralelas entre si e um terceiro guia perpendicular aos dois primeiros, formando uma estrutura semelhante a letra H (Figura 14). Os pontos mais importantes deste sistema é que os motores são estacionários (ficam sempre no mesmo lugar). Isso permite acelerações rápidas, usa apenas uma correia, tornando essa configuração leve e compacta, isso ocorre porque todas as polias e motores estão no mesmo plano.

Figura 14 – Sistemas de posicionamentos H-Frame e Core-XY.



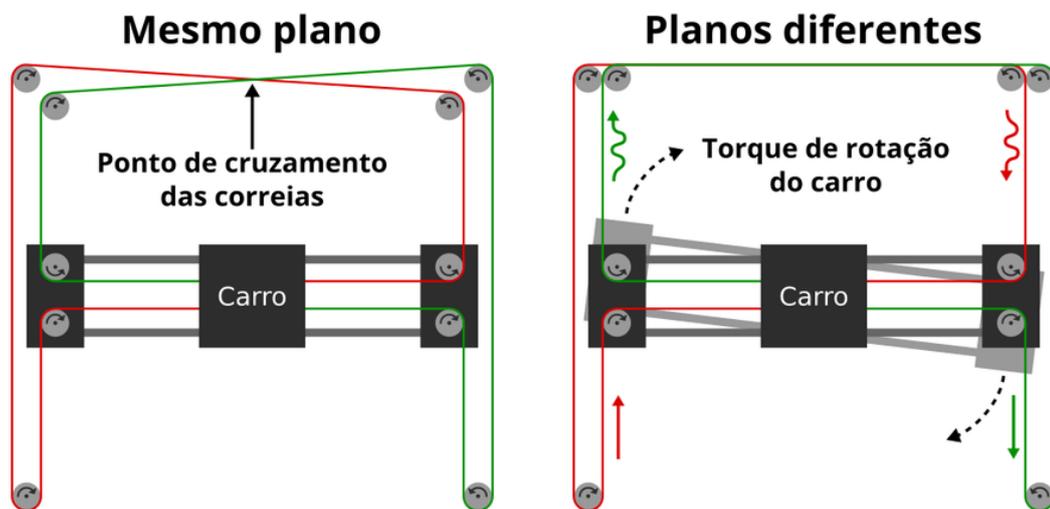
Fonte: Elaborada pelo autor.

Outra implementação de movimento linear de dois eixos é o Core-XY (MOYER, 2012). Foi desenvolvida no MIT *Media Labs*, é um projeto de código aberto, sendo uma plataforma de movimentação leve, usa dois motores estacionários e duas correias de forma cruzada (Figura 14).

Como o sistema H-Frame usa apenas uma correia o mesmo deve ser construído em uma estrutura sólida, portanto, a precisão de posicionamento do carro depende da rigidez das suas guias lineares. O sistema Core-XY consegue resolver esse problema, adicionando duas polias e cruzando as suas correias para equilibrar as forças, portanto, pode ser construído em estruturas flexíveis e compactas, é preciso, repetitivo e linear. Existem duas maneiras de construir o sistema de correias do Core-XY:

- 1) Ambas as correias no mesmo plano equilibrando as forças no ponto de cruzamento, mas gerando fricção das correias no ponto de cruzamento.
- 2) Ambas as correias podem ser configuradas em planos diferentes, no entanto, essa montagem cria um torque de rotação no carro. A Figura 15 ilustra as diferenças.

Figura 15 – Montagens Core-XY.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A escolha do sistema de correias do Core-XY depende da aplicação final da máquina, a montagem no mesmo plano tende a equilibrar as forças de movimento do carro. Permitindo a construção de máquinas com baixa rigidez estrutural. A montagem em planos diferentes requer uma estrutura mais rígida, mas evita o problema de fricção, eliminando o cruzamento das correias. Apesar de gerar um torque de rotação no carro, a mesma tende a ser menos afetada na sua precisão de posicionamento se comparado ao sistema H-Frame.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia usada para o estudo de caso exploratório, onde são descritas todas as etapas em detalhes para a construção do protótipo, com o objetivo de tornar o experimento replicável. É detalhado como os ensaios são feitos de acordo com os métodos descritos para o teste de capacidade regidos pela norma da ABNT.

Para uma melhor estruturação do projeto esse capítulo foi subdividido em quatro seções, conforme segue:

- 1) Projeto mecânico
- 2) Projeto elétrico
- 3) *Hardware e software*
- 4) Teste de compatibilidade

3.1 Projeto Mecânico

Essa etapa envolve a elaboração do desenho do protótipo, identificação e seleção dos componentes mecânicos utilizados, tais como guias lineares, rolamentos, polias e correias.

3.1.1 Desenho do protótipo

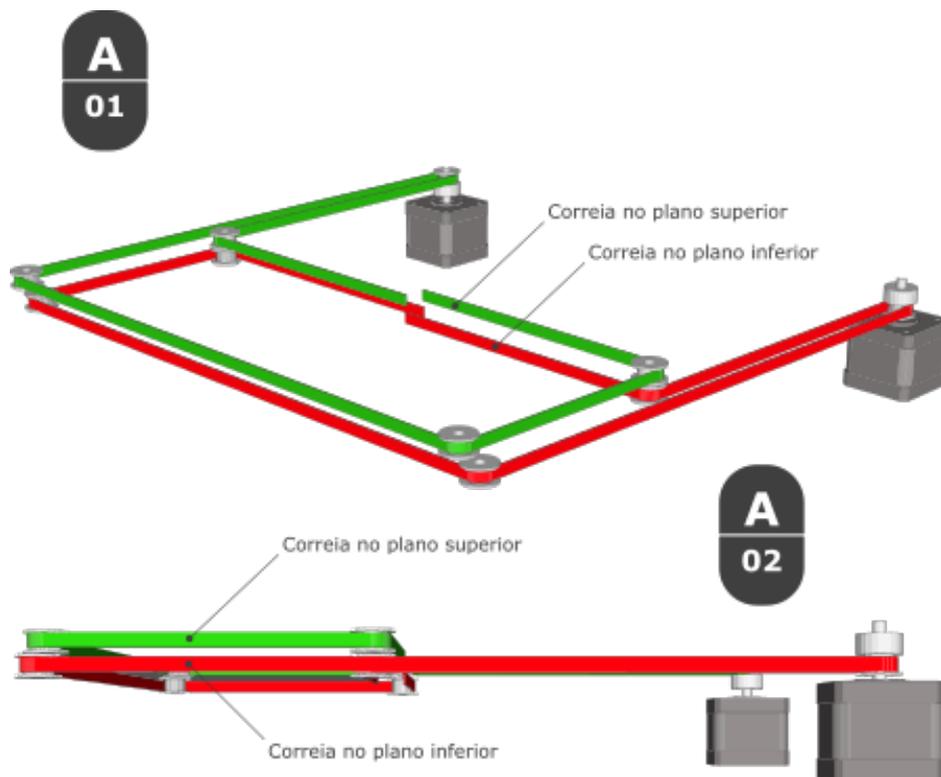
Antes da realização do desenho do projeto, foi estabelecido alguns pré-requisitos para a construção do protótipo os quais foram definidos como:

- Área útil de impressão – Para fins de testes a área útil é de 250 mm de largura por 230 mm de comprimento.
- Sistema de movimentação – Foi usado o Core-XY, por ser uma plataforma de movimentação leve e por usar dois motores estacionários permitindo acelerações rápidas.
- Sistema de posicionamento baseado em coordenadas absolutas.

O projeto mecânico foi desenvolvido com o auxílio de uma ferramenta para a criação de modelos em 3D chamada SketchUp¹. Para a construção do sistema de correias foi escolhido a configuração em planos diferentes, assim evitando a fricção das correias como mostra a Figura 16.

¹ Disponível em: <https://www.sketchup.com/pt-BR>. Acesso em: 22 fev. 2019

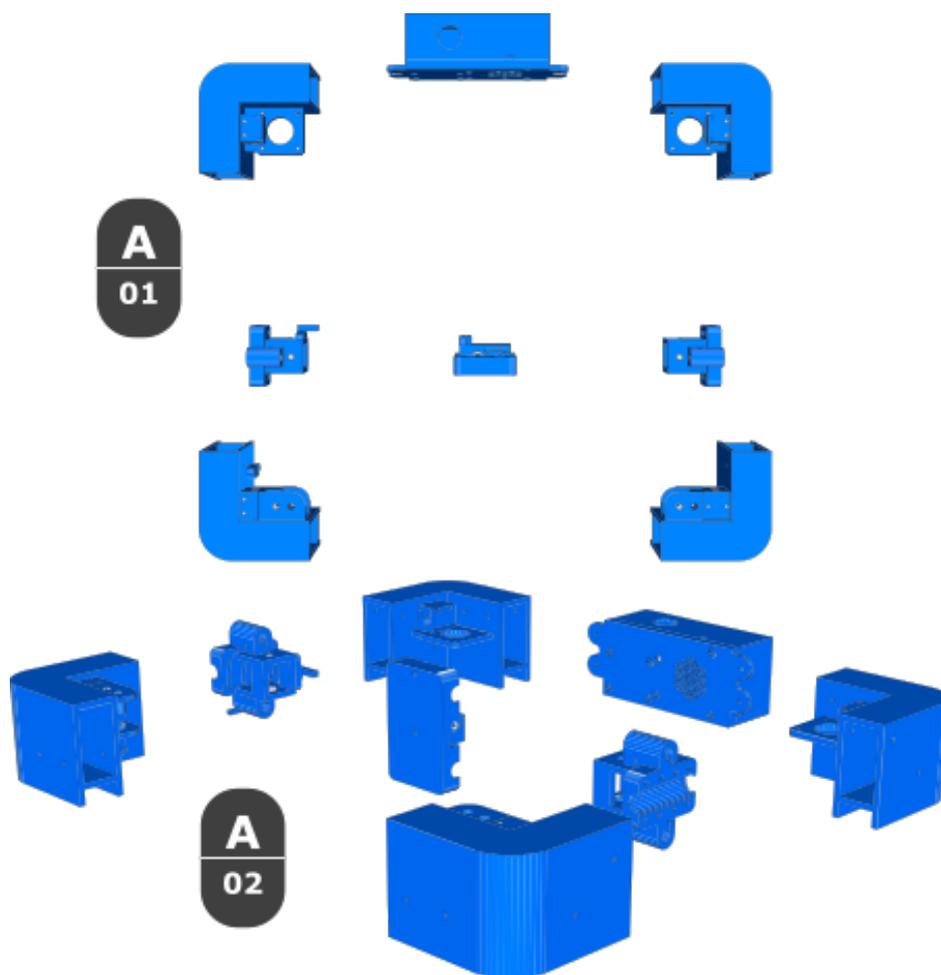
Figura 16 – Montagem da correia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a interligação dos componentes internos e externos do protótipo, foi impresso algumas peças usando uma impressora 3D. A Figura 17 ilustra as peças.

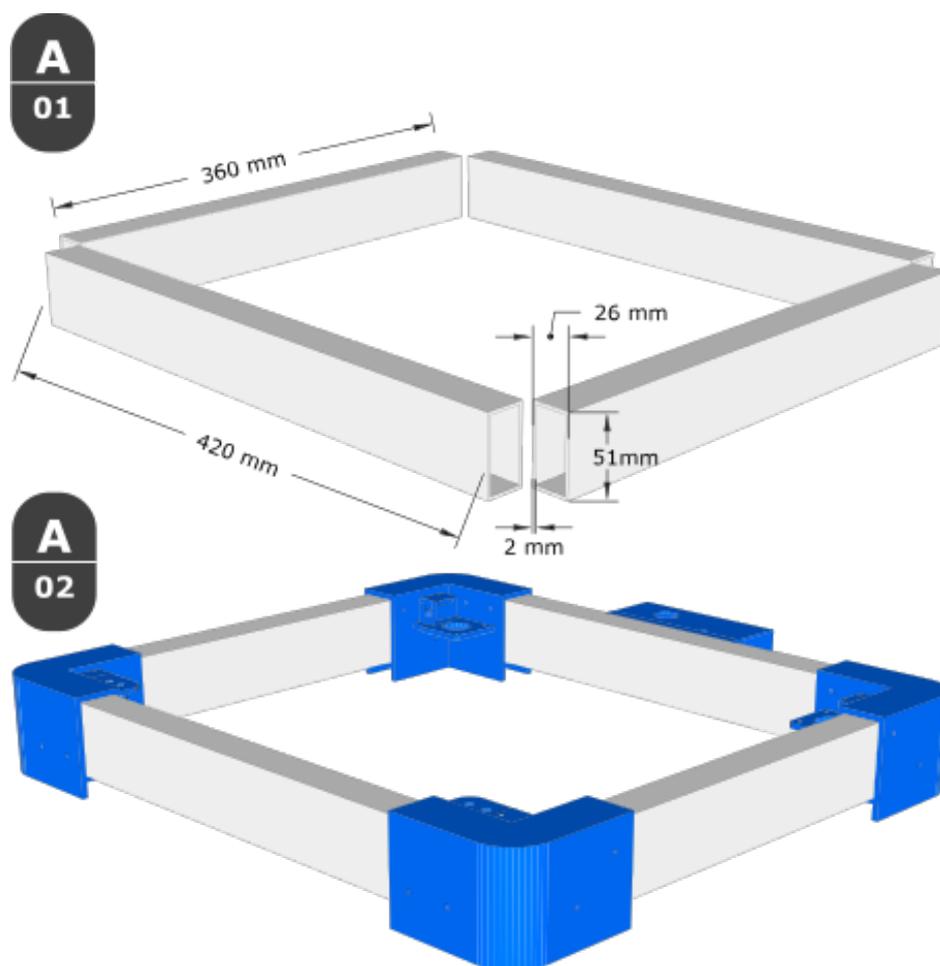
Figura 17 – Peças impressas em impressora 3D.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para dar a rigidez necessária para a estrutura do protótipo, foi utilizado quatro perfis de alumínio de 51 × 26 mm e parede interna de 2 mm (Figura 18 A-01), sendo dois perfis de 420 mm de largura e dois de 360 mm de largura. A Figura 18 A-02 ilustra os perfis montados nas partes impressas.

Figura 18 – Estrutura do protótipo.



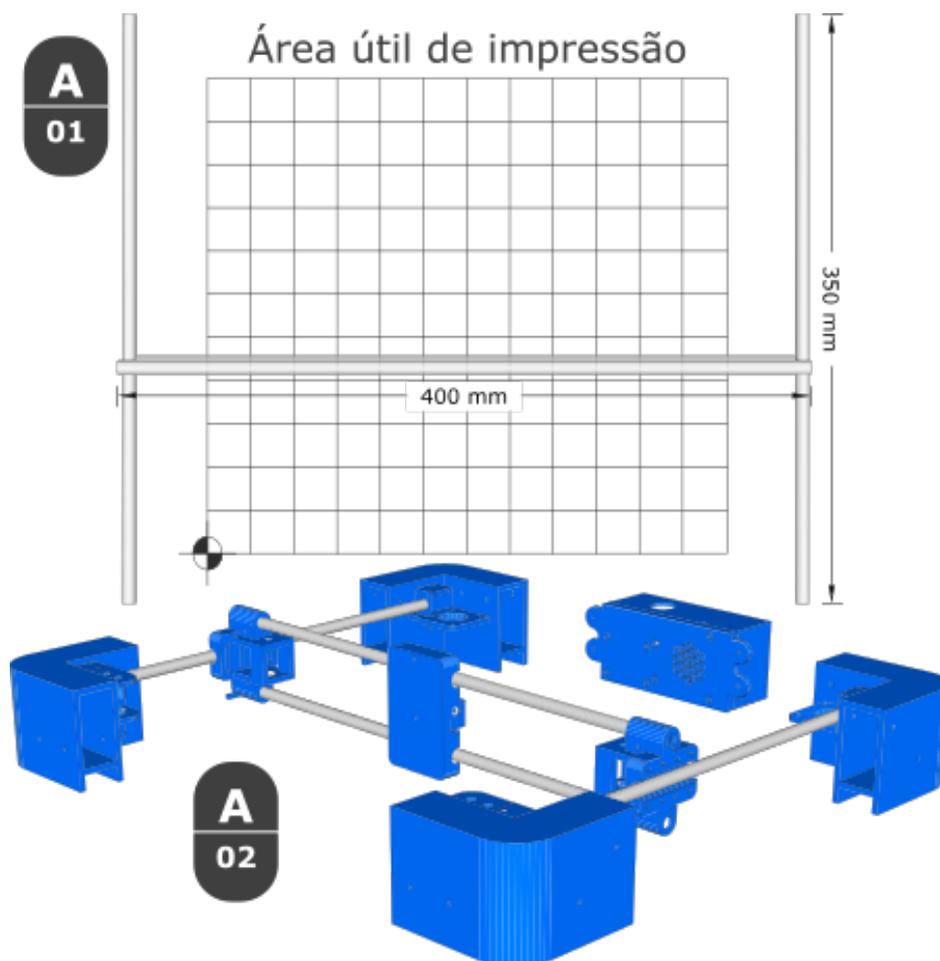
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.2 Guias Lineares

As guias de eixo lineares utilizadas na construção do protótipo devem proporcionar rigidez para minimizar o torque de rotação do carro, conforme descrito na Seção 2.5.1. As guias lineares são geralmente utilizadas com rolamentos lineares, entretanto, o constante atrito com o rolamento pode causar microfissuras em sua estrutura, apresentando desgastes ao longo do tempo.

Para a montagem do protótipo foi usado quatro eixos lineares de 8 mm de diâmetro feito com aço 1045 e tolerância H7, sendo dois eixos de 350 mm e dois de 400 mm (Figura 19 A-01), respeitando a área útil de impressão conforme definido na Seção 3.1. As guias montados nas partes impressas podem ser observadas conforme a Figura 19 A-02.

Figura 19 – Guias Lineares.



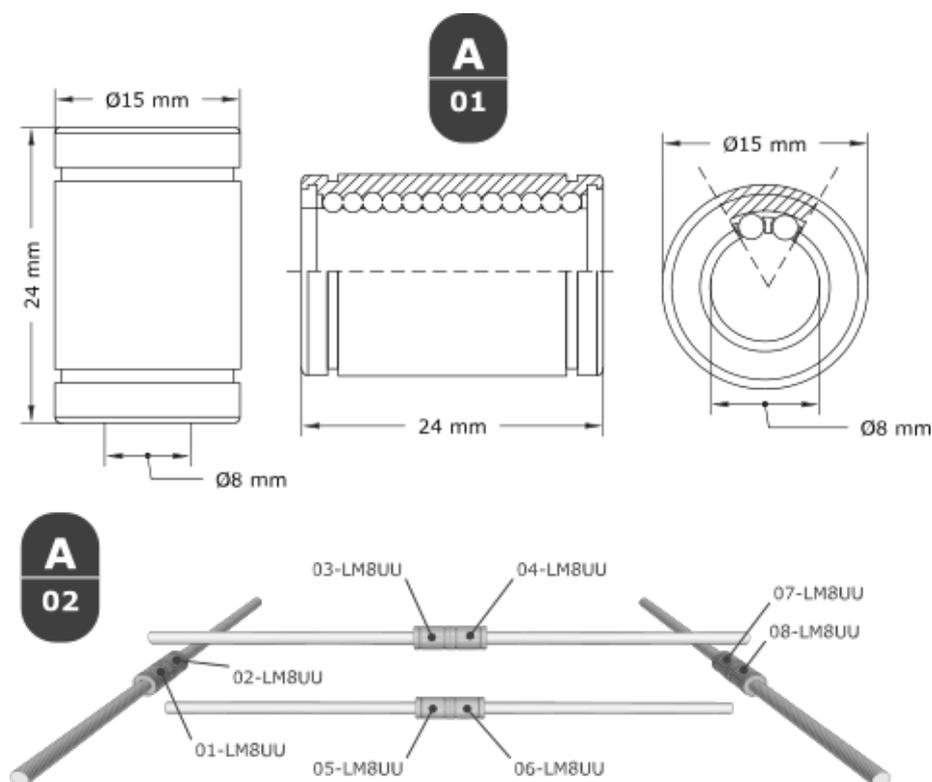
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.3 Rolamentos Lineares

Rolamentos lineares são constantemente usados em movimentos de translação em linhas retas com leve índice de atrito para movimentar objetos com alta precisão. Geralmente são constituídos por anéis (um interno e um externo) e corpos rolantes (esferas ou rolos).

O rolamento selecionado foi o rolamento linear modelo LM8UU (Figura 20 A-01), compatível com eixos lineares de 8 mm de diâmetro. Cada eixo linear utiliza dois rolamentos totalizando oito rolamentos para o protótipo. A distribuição dos rolamentos podem ser observados conforme a Figura 20 A-02.

Figura 20 – Rolamentos LM8UU.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.4 Polias

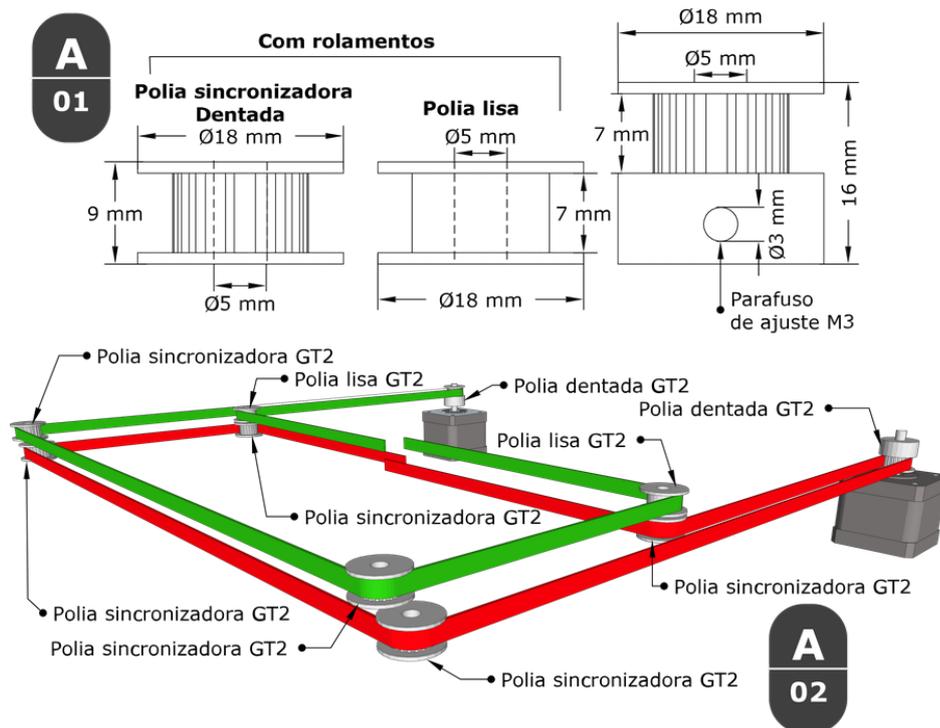
A polia é constituída por uma roda de material rígido, normalmente metal, pode ser lisa ou dentada. Quando acionada por uma correia, a polia gira em um eixo para transferir força e energia cinética a outro objeto.

O sistema de movimentação escolhido foi o Core-XY conforme a Seção 3.1, esse sistema utiliza oito polias com rolamentos para o movimento do carro, sendo duas polias lisas e seis dentadas (sincronizadoras) e mais duas polias dentadas (sem rolamento) para os motores (polia motora). O modelo de polia selecionada para o protótipo foi a GT2, tendo as seguintes características:

- Passo: 2 mm
- Número de dentes: 20
- Furo eixo: 5 mm
- Material: Alumínio

A Figura 21 A-01 ilustra as dimensões da polia GT2 e a Figura 21 A-02 ilustra o posicionamento das polias no sistema Core-XY.

Figura 21 – Polias GT2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

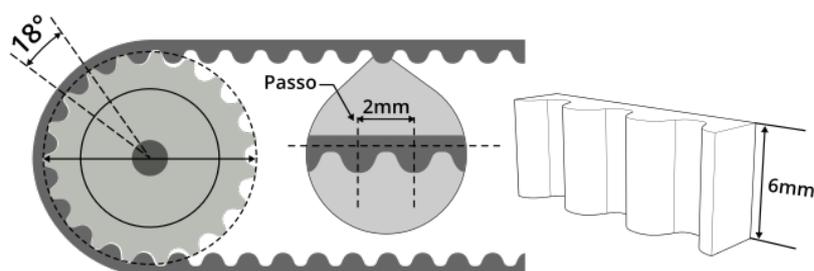
3.1.5 Correias

A correia sincronizadora (dentada), se distingue pelo fato de que o torque e potência transmitida para a polia não depende apenas de atrito. Isso ocorre porque a correia dentada se encaixa nos canais da roda dentada mantendo um movimento em sincronia (Figura 22). Esse encaixe promove uma alta transmissão de potência e mantém a velocidade angular constante sem deslizamento. O perfil do dente e o passo da correia assim como o perfil da polia devem ser compatíveis e fabricados de maneira precisa. O perfil GT2 tem uma forma arredondada, assim mantém uma suavidade, aumentando a proteção contra saltos entre o encaixe dos dentes. Essa suavidade é perceptível principalmente nas mudanças de direção, garantindo movimentos lineares com uma potência transmissível maior que perfis trapezoidais clássicos.

Para o protótipo foram utilizadas duas correias de GT2 1400 mm de comprimento, uma para cada plano conforme ilustrado na Figura 16 da Seção 3.1.1 com as seguintes características:

- Tipo: GT2
- Passo: 2 mm
- Altura: 6 mm

Figura 22 – Correia dentada sincronizadora GT2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Projeto Elétrico

O projeto elétrico apresenta a definição dos motores assim como seus *drivers* de potência, a escolha do *laser* assim como sua potência e comprimento de onda, as chaves fim de curso e a definição da fonte de alimentação utilizada.

3.2.1 Motores de passo

O motor de passo é um transdutor que converte pulsos elétricos em movimento mecânico. Basicamente, converte energia elétrica em movimento controlado através de pulsos, o que possibilita o deslocamento por passo, onde o passo é o menor deslocamento angular.

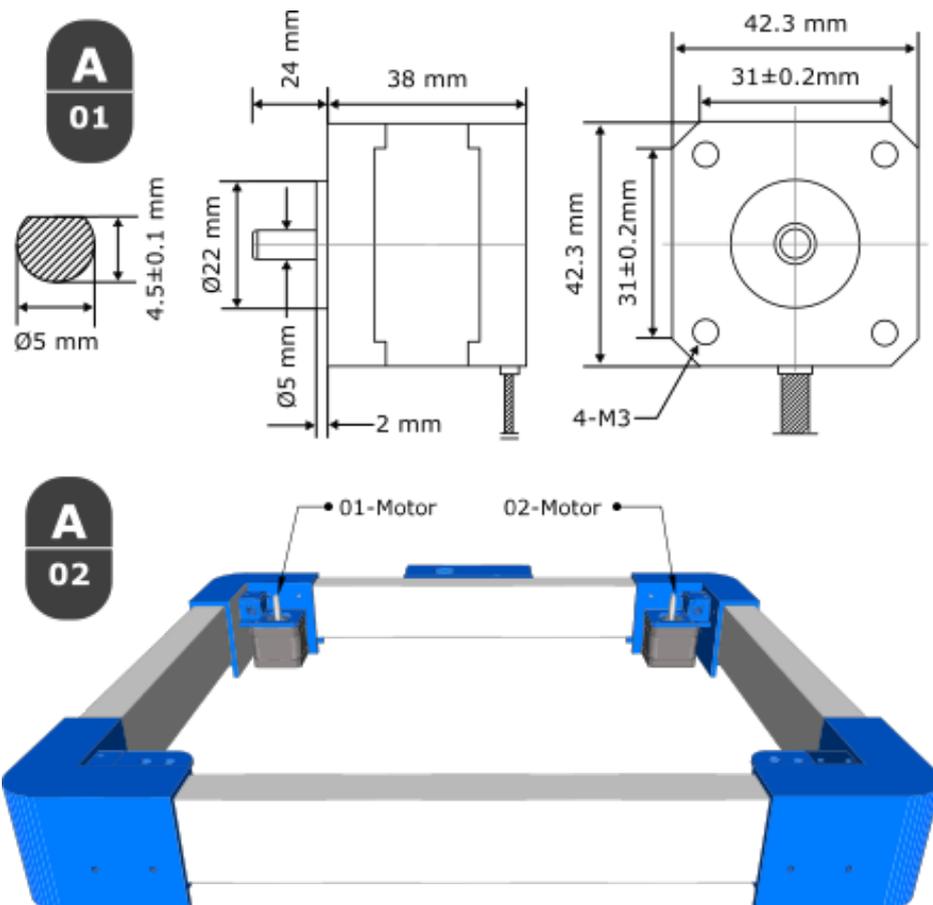
Para o protótipo foram utilizados dois motores de passo Nema17 (Figura 23 A-02), sua escolha se deve ao seu tamanho e facilidade de controle de deslocamento por passo. O modelo do motor é o Anet 42shdc3025-24b² (Figura 23 A-01) com as seguintes características:

- Potência nominal: 14 W
- Tensão nominal: 3,96 V
- Corrente nominal: 0,9 A
- Velocidade nominal: 1000 rpm
- Torque nominal: 0,34 Nm
- Ângulo de passo: 1,8°
- Precisão Angular passo: ± 5%
- Fase: 2

² Disponível em: https://www.gearbest.com/3d-printer-parts/pp_540282.html. Acesso em: 26 abr. 2019.

- Resistência: $4,4 \Omega \pm 10\%$
- Tamanho $42 \times 42 \times 40$ mm
- Peso: 280g

Figura 23 – Motores Nema17.

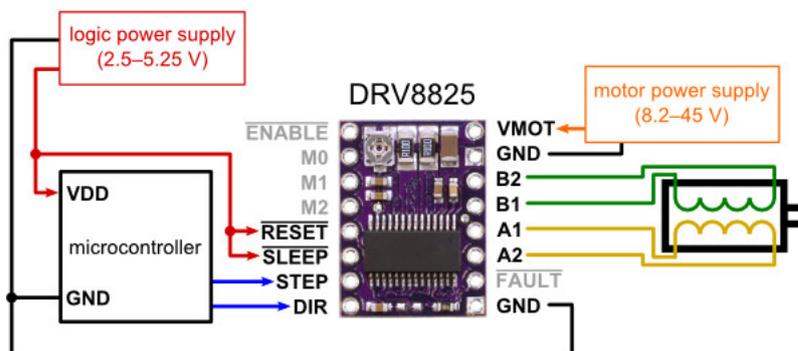


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2 Drivers de potência

Driver é um circuito lógico que controla o motor de passo, consegue realizar a divisão dos micropassos do motor, para que o mesmo alcance movimentos precisos. O *driver* é a ponte de comunicação entre o microcontrolador e o motor de passo. Para a construção do protótipo foi escolhido o *drive* (um para cada motor) baseado no CI DRV8825 da Pololu. A Figura 24 mostra o *drive* e suas ligações.

Figura 24 – emphDriver DRV8825 - Pololu.



Fonte: <https://www.pololu.com/product/2133>.

Conforme o catálogo do fabricante, esta placa controla um motor de passo bipolar e possui limitação de corrente ajustável. Possui proteção contra sobreaquecimento e seis níveis de resoluções de passo (1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 e 1/32). Opera na faixa de 8,2 V a 45 V DC, pode fornecer até 1,5 A por fase continuamente sem a necessidade de um dissipador ou 2,2 A com dissipador.

Uma maneira de maximizar o desempenho do motor de passo é usar o máximo de voltagem possível para a sua aplicação. No entanto, para usar com segurança tensões acima da tensão nominal de um motor de passo, a corrente da bobina deve ser ativamente limitada para evitar que exceda a corrente nominal do motor. Para fazer esse ajuste é preciso calcular o valor de referência (V_{REF}) usando a Fórmula (3.1), fornecida na página 12 da folha de dados (datasheet)³ do fabricante:

$$I_{chop} = \frac{V_{(xREF)}}{5 \times R_{ISENSE}} \quad (3.1)$$

Onde o R_{ISENSE} é o valor do resistor que se encontra no *driver* ($0,10 \Omega$), o I_{chop} é o valor da corrente nominal do motor 0,9 A (Seção 3.2.1), fazendo as substituições:

$$0,9 = \frac{V_{REF}}{5 \times 0,1} = V_{REF} = 0,9 \times 0,5 = 0,45 V$$

Para que o motor tenha a sua corrente limitada a 0,9 A, o valor de referência do *driver* não pode ser superior a 0,45 V. O valor ajustado nos *drivers* do protótipo foi de 0,45 V isso corresponde 100% de sua corrente nominal. No entanto, exceder essa corrente nominal poderá gerar super aquecimento e desgaste prematuro do motor de passo degradando sua vida útil.

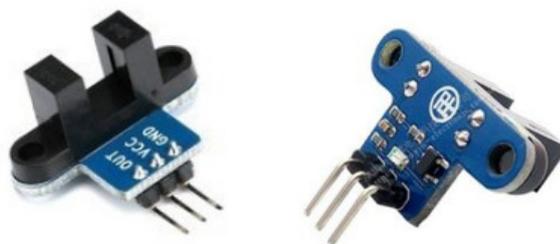
3.2.3 Chave fim de curso

Muito embora a escolha de uma abordagem em malha aberta para controle dos motores dispense sensores de posição, ao menos uma indicação de posição real deve ser dada ao sistema eletrônico para inferir a sua posição inicial (*homing*). A chave

³ <https://www.pololu.com/file/0J590/drv8825.pdf>

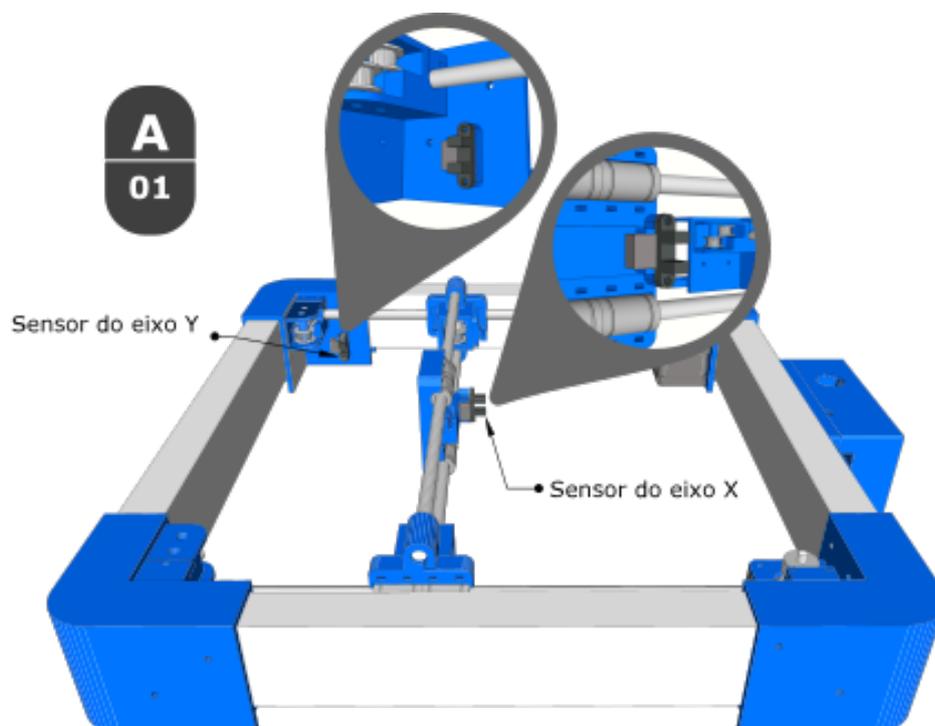
fim de curso (*end stop*) é usada para detectar o limite físico da área de trabalho e determinar a sua posição inicial, para essa tarefa foram utilizados sensores ópticos. O sensor óptico possui alta sensibilidade ao objeto cuja proximidade é medida, sem o desgaste que ocorre com sensores por contato mecânico. O princípio de funcionamento consiste na polarização de um fotodiodo ou fototransistor através de um LED. Caso haja um material opaco bloqueando o caminho no qual a luz incide sobre o fotodiodo, o mesmo comuta sua saída lógica. Um exemplo deste sensor (também chamado de interruptor óptico) é mostrado na Figura 25, a Figura 26 ilustra os locais de instalação por eixo no protótipo.

Figura 25 – Chave fim de curso óptica.



Fonte: <https://www.tecnotronics.com.br/sensor-de-velocidade-sensor-de-contagem.html>.

Figura 26 – Posição dos sensores ópticos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.4 Diodo *Laser*

Diodos *lasers* são muito utilizados na tecnologia atual, estão na base da transmissão de dados em fibras ópticas, leitores de CDs, DVDs e *blu-ray*. A principal diferença do diodo *laser* se comparado a outros *lasers*, reside na origem da fonte de energia (apenas corrente elétrica). Seu meio ativo mais simples que é constituído por um diodo semiconductor de junção P-N, esses semicondutores são geralmente compactos.

Como o material usado para revestir a PCI foi uma tinta fotossensível UV, a escolha do *laser* deve atender ao comprimento de onda na faixa da região UV, que vai de 200 nm a 450 nm (Seção 2.2.2). Outra característica importante para a escolha do *laser* é o seu tamanho e simplicidade de montagem, sendo assim o diodo *laser* atende a essas características, seja em seu tamanho compacto, quanto ao comprimento de onda. O diodo *laser* escolhido para o protótipo tem as seguintes características:

- Potência: 500 mW
- Comprimento de onda: 405 nm
- Corrente elétrica: 2 A
- Tensão de entrada: 12 V DC
- Temperatura de trabalho: -10 °C ~ + 40 °C
- Foco ajustável

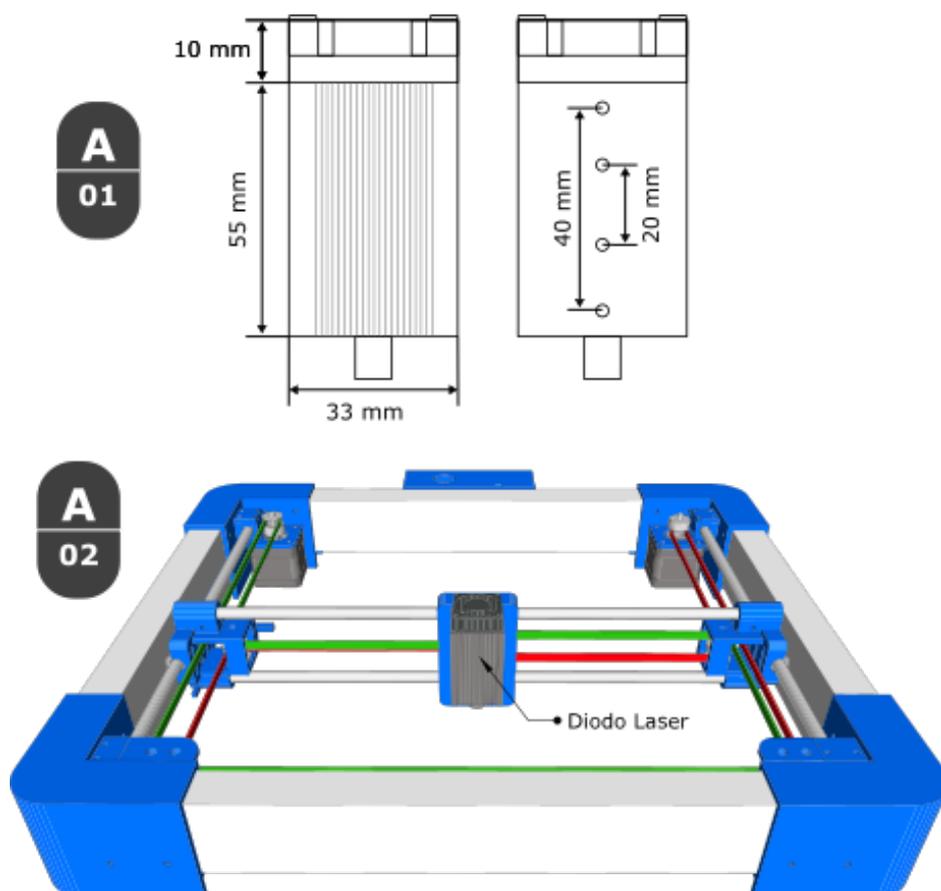
O *laser* já acompanha um módulo TTL (Figura 27) que fará a comunicação entre o diodo *laser* e o microcontrolador, para o controle de acionamento e potência do feixe de *laser*. Seu comprimento de onda de 405 nm assegura uma boa profundidade de cura conforme relatado na Seção 2.2.2. A Figura 28 ilustra suas dimensões e seu local de montagem no protótipo.

Figura 27 – Diodo Laser 500 mW 405 nm e módulo de controle TTL.



Fonte: <https://www.dx.com/p/500mw-405nm-Focusing-Blue-Purple-Laser-Module-Engraving-With-TTL-Control-Laser-Tube-Diode---Protective-Goggles-black-2066093>

Figura 28 – Local de montagem do laser.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.5 Fonte de alimentação

Após a seleção dos motores, *drivers* e o diodo *laser*, foi preciso fazer a escolha de uma fonte de alimentação, a qual possa suprir a potência necessária para o funcionamento do protótipo. Para a fonte de alimentação foi escolhido a tensão de 12 V DC, essa escolha se baseia no fato de que todos os componentes usados no protótipo podem trabalhar com essa tensão. Além da escolha da tensão, é preciso garantir que a fonte consiga suprir a corrente necessária para o bom funcionamento de todos os componentes do protótipo.

Segundo o catálogo do fabricante do motor, sua potência nominal (Seção 3.2.1) é de 14 W, logo dois motores consomem 28 W. Para determinar a potência consumida pelo diodo *laser* foi utilizado a Fórmula (3.2).

$$Watt = Amp \times Volts \quad (3.2)$$

Conforme as especificações (Seção 3.2.4) do fabricante do diodo *laser*, sua corrente é de 2 A e sua tensão é de 12 V, fazendo as substituições:

$$W = 2 A \times 12 V = 24 W$$

Fazendo o cálculo da potência ativa dos motores e do diodo *laser*:

$$28 + 24 = 52 W$$

Após o cálculo da potência ativa dos motores e do diodo *laser*, foi calculado a quantidade de amperes que a fonte deve suportar:

$$Amp = \frac{Watt}{Volts} \implies \frac{52 W}{12 V} = 4,33 A$$

Com base nesse valor a fonte utilizada no protótipo foi o modelo S-120-12 de 12 V DC suportando até 10 A (Figura 29). Sendo mais que suficiente para garantir o funcionamento dos motores, *laser* e demais componentes da máquina.

Figura 29 – Fonte de alimentação chaveada 12 V 10 A.



Fonte: <https://www.dx.com/pt/p/s-120-12-12v-2a-iron-case-power-supply-silver-2036771>.

3.3 Hardware e Software

Esta etapa define a escolha da plataforma para implementação do *hardware* e *firmware*, o qual atuará como intermediador entre o *software*, responsável pelo envio de dados para a parte eletrônica, a qual é responsável pela execução dos movimentos da máquina.

3.3.1 Hardware

A placa escolhida para implementação do *hardware* e *firmware* foi a Arduino Uno Rev3⁴. A plataforma Arduino, é uma placa de desenvolvimento que une ferramentas de *software* e *hardware*, formando uma solução para aplicações práticas em sistemas embarcados. Foi criada para permitir flexibilidade em projetos, sendo destinada para aplicações educacionais, além de possuir um conjunto de *hardware* (*Creative Commons Attribution Share-Alike*) e *software* (GPL) aberto⁵. A programação via computador se dá por uma IDE (*Integrated Development Environment*)⁶, não sendo necessário nenhum *hardware* externo para a gravação de programas. O Arduino Uno Rev3 possui um microcontrolador Atmeg328P e opera a um clock de 16Mhz, possui 14 pinos digitais, onde 6 pinos podem ser utilizados como PWM e 6 pinos para entradas analógicas. Opera com uma tensão interna de 5 V DC, pode receber uma tensão de entrada recomendada de 7 V a 12 V DC, podendo chegar a uma tensão limite de 20 V DC. Possui interface serial, SPI, I2C e pinos de interrupção externa, cada pino de entrada/saída pode fornecer até 20 mA. Para gravação o Uno já possui em seu *hardware* um *chip* conversor usb/serial e um conector ICSP, além de um botão de reset manual. Sua memória *flash* possui 32 kB, onde 0,5 kB é utilizado pelo *bootloader* (programa inicializador), 2 kB de SRAM e 1 kB de EEPROM.

Apesar de o Arduino Uno Rev3 ser uma placa de desenvolvimento destinada para aplicações práticas, fazer as ligações com os *drivers* de potência, módulo de controle TTL e os sensores ópticos, seria uma tarefa muito complexa e susceptível a erros. Para esse propósito, foi utilizado um *shield* (escudo) Arduino para facilitar as ligações dos componentes na placa. O *shield* usado foi o Arduino CNC Shield V3, desenvolvido pela Protoneer.co.nz⁷ que está sob a licença *Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported License*⁸. Ele foi projetado para ser compatível com Grbl (v0.9), o mais popular interpretador de G-Code *opensource* (código aberto) para Arduino Uno. Pode ser usado para controlar

⁴ Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 26 abr. 2019.

⁵ Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/FAQ#toc3>. Acesso em: 26 abr. 2019.

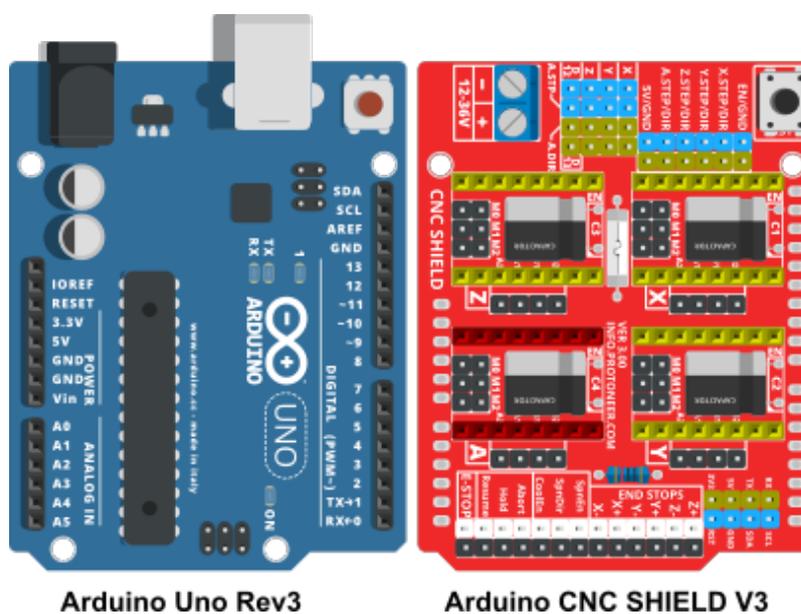
⁶ Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. Acesso em: 26 abr. 2019.

⁷ Disponível em: <https://blog.protoneer.co.nz>. Acesso em: 26 abr. 2019.

⁸ Disponível em: https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/br/deed.pt_BR. Acesso em: 26 abr. 2019.

uma gama variada de máquinas CNC para atuar em diversos seguimentos incluindo usinagem, gravura/corte a *laser*, impressão 3D, ou em qualquer projeto que precise controlar motores de passo com precisão. Possui suporte para 4 eixos com *drivers* removíveis, utiliza duas portas digitais de entrada/saída para controlar cada motor. Possui bornes para alimentação externa dos motores, podendo receber tensões entre 12 V a 36 V DC. Conexão para ativação e direção do motor (*spindle*), conexão para ativação de refrigeração e suporte a dois *end stops* por eixo (XYZ). A Figura 30 ilustra a visão superior das placas.

Figura 30 – Arduino Uno Rev3 e Arduino CNC Shield V3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O Arduino CNC Shield V3 se encaixa perfeitamente sobre o Arduino Uno Rev3, não sendo necessário nenhum ajuste prévio para esse encaixe. Após o encaixe, foi preciso fazer a configuração da resolução de micropassos dos motores. O Arduino CNC Shield V3 possui três pares de pinos por eixo descritos como M0, M1 e M2 para essa configuração, e disponibiliza uma tabela de configuração para o *driver* DVR8825 em seu *sítio web*. A Tabela 3 apresenta as possíveis configurações, onde o valor alto indica que um *jumper* (conecta dois pontos de um circuito eletrônico) está inserido e baixo indica que nenhum *jumper* está inserido.

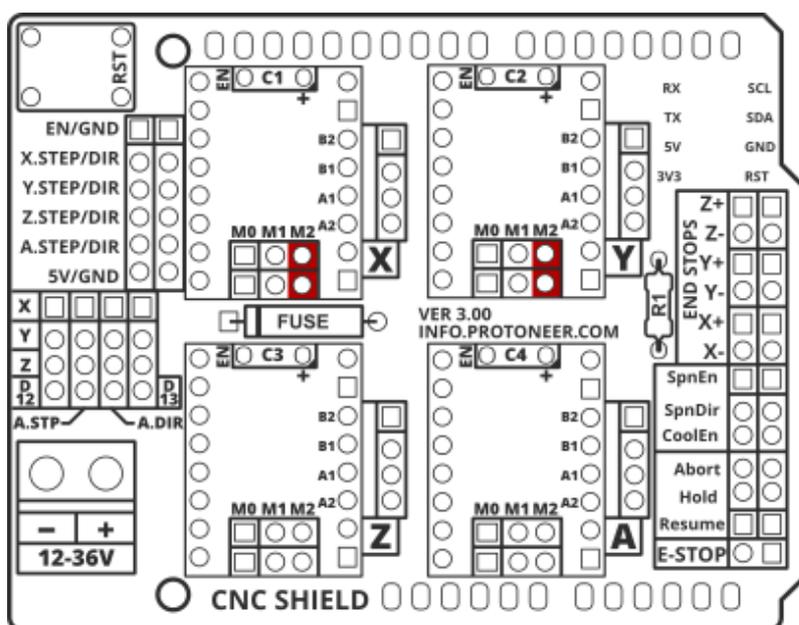
Tabela 3 – Tabela de configuração de micropassos do driver DRV8825.

Mode0	Mode1	Mode2	Resolução de micropassos
Baixo	Baixo	Baixo	Passo completo
Alto	Baixo	Baixo	Meio passo
Baixo	Alto	Baixo	1/4 passo
Alto	Alto	Baixo	1/8 passo
Baixo	Baixo	Alto	1/16 passo
Alto	Baixo	Alto	1/32 passo
Baixo	Alto	Alto	1/32 passo
Alto	Alto	Alto	1/32 passo

Fonte: Adaptada de <https://blog.protoneer.co.nz/arduino-cnc-shield-v3-00-assembly-guide>.

Com base na Tabela 3, foi definido a resolução de 1/16 micropassos para o protótipo. A placa Arduino CNC Shield V3 foi configurada usando um *jumper* no seletor M2 no eixo X e outro no eixo Y. A Figura 31 ilustra em vermelho a posição dos *jumpers*.

Figura 31 – Configuração de micropassos.

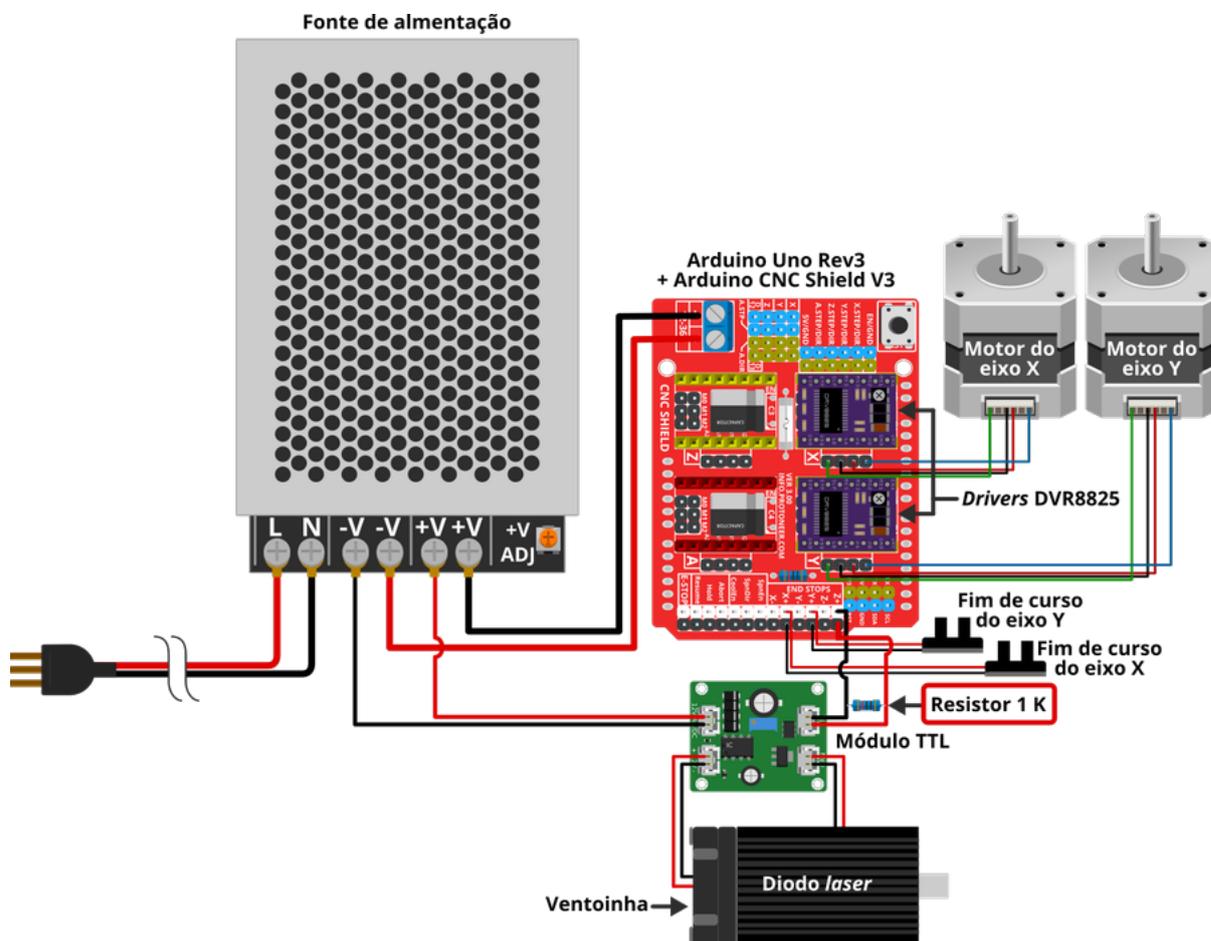


Fonte: Adaptada de <https://blog.protoneer.co.nz/arduino-cnc-shield-v3-00-assembly-guide>.

Após configurar a resolução de micropassos, foi inserido um *driver* DVR8825 no soquete do eixo X e outro no soquete do eixo Y do Arduino CNC Shield V3. O

próximo passo foi a inserção dos cabos dos motores em seus respectivos soquetes, a Figura 32 ilustra o diagrama final de toda a montagem eletrônica.

Figura 32 – Diagrama de montagem eletrônica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O **resistor de 1 k** ilustrado na Figura 32 tem a função de corrigir um problema encontrado durante a inicialização do Arduino Uno Rev3 com o Grbl, esse problema pode ocasionar o acionamento indesejado do diodo *laser*. Durante a inicialização do *bootloader* do Atmega328P os pinos digitais ficam em um estado indefinido, ou seja, não estão em nível lógico alto ou baixo. Isso pode ocasionar o acionamento indesejado do diodo *laser* durante esse período, a função do resistor (*pull-down*) é sempre manter a porta onze (*Spindle enable* no Grbl) do microcontrolador em nível lógico baixo durante o estado indefinido.

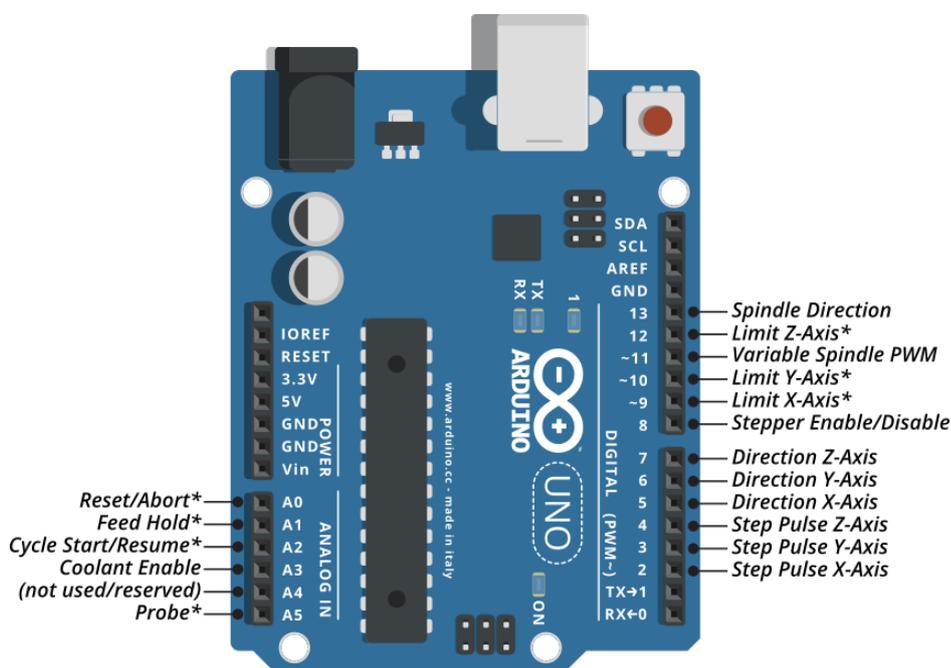
3.3.2 Firmware

O *firmware* de controle utilizado foi o Grbl⁹, o interpretador de G-Code escrito em C altamente otimizado pelo indiano Simen Svale Skogsrud, lançado sob a licença

⁹ Disponível em: <https://github.com/gnea/grbl>. Acesso em: 26 abr. 2019.

GPLv3¹⁰. Foi adaptado para uso em vários projetos CNC devido ao seu desempenho e simplicidade. Foi desenvolvido inicialmente para o Atmega328, pode manter até 30 kHz de pulsos de controle estáveis e livres de *jitter* (atraso de dados). Sua comunicação é feita através da porta USB do Arduino Uno Rev3. Usa um fluxo constante de instruções de código G. O código é enviado através de um computador ou qualquer outro meio que possa se comunicar através do protocolo serial RS-232. O Grbl mapeia os pinos do Arduino Uno Rev3 de acordo com as suas funcionalidades, a Figura 33 ilustra essas funcionalidades.

Figura 33 – Funcionalidades dos pinos no Arduino Uno Rev3 usados pelo Grbl.



* - Indica os pinos de entrada que são mantido em nível lógico alto com resistor de *pull-up* interno.

Fonte: Adaptada de <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Connecting-Grbl>.

A partir da versão v1.1+ o Grbl usa por padrão o pino digital 12 para a chave fim de curso do limite Z e o pino digital 11 para variar a velocidade do motor. Em versões anteriores o Grbl usa o pino 12 para variar a velocidade do motor e o pino 11 para a chave fim de curso do eixo Z. Na versão v0.9 e anteriores do Grbl, essa configuração pode ser alterada e compilada em seu código fonte para manter compatibilidade com placas (*shields* Arduino) antigas. A seção 3.3.1 descreve a placa utilizada no protótipo e o diagrama de montagem dos componentes conforma a Figura 32. Conforme observado no diagrama de montagem, o módulo de controle TTL do diodo *laser* é conectada no pino correspondente a chave fim de curso do eixo Z. Essa montagem se fez necessária pelo fato do Arduino CNC Shield V3 ser compatível com a versão v0.9 do Grbl, onde o pino digital 11 do shield está mapeado para a chave fim de curso do eixo Z. As versões

¹⁰ Disponível em: <https://www.gnu.org/licenses/quick-guide-gplv3.pt-br.html>. Acesso em: 26 abr. 2019.

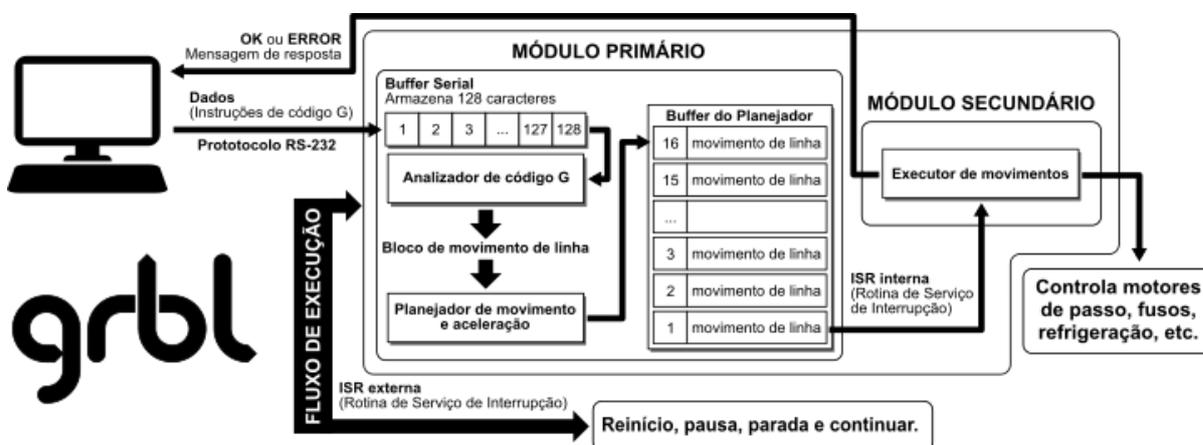
superiores do Arduino CNC Shield V3 já mapeiam esses pinos para serem compatíveis com a versão instalada no protótipo, que foi a v1.1f do Grbl.

O Grbl inclui gerenciamento total de aceleração com antecipação. Isso significa que o controlador pode planejar sua velocidade de movimentação, se antecipando em até 18 movimentos, fornecendo acelerações suaves e curvas livres de *jerk* (movimentos bruscos).

O funcionamento do Grbl consiste, essencialmente, na execução paralela de dois módulos. O módulo primário recebe pela porta serial as linhas de comando (código G), as quais são interpretadas e decompostas em blocos de dados. Cada bloco contém basicamente informações de uma trajetória em linha reta, aceleração e velocidade do movimento. Os blocos passam pelo planejador de aceleração e posteriormente são colocados em um *buffer* FIFO (primeiro a entrar é o primeiro a sair), de no máximo 16 blocos (no caso do Atmega328).

Enquanto o módulo principal é executado, o módulo secundário é chamado várias vezes por interrupções internas. Ele controla os motores de passo, enviando pulsos de passo e direção para os *drivers* dos motores, a partir das informações contidas na fila de blocos. Os eventos são processados sequencialmente através dos blocos contidos no *buffer* do planejador até que ele esteja vazio. Se o bloco for aceito é retornada uma mensagem “ok”, e caso o *buffer* esteja cheio, é retornado uma mensagem “error” contendo o código do erro. Além disso, o fluxo de dados deve ser constante e ininterrupto de modo a minimizar a possibilidade de a máquina sofrer paradas súbitas. Outras características, como pausa e parada, redução de velocidade e ciclos de *homing*, ocorrem em tempo real de forma assíncrona. A Figura 34 ilustra o fluxo de funcionamento do Grbl.

Figura 34 – Fluxo de funcionamento do Grbl.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.2.1 Configurações do Grbl

Esta seção foi dividida em cinco etapas, cada etapa descreve as configurações usadas no Grbl para o funcionamento do protótipo e estão em ordem cronológica.

- 1) Antes de compilar o código do Grbl duas alterações foram feitas em seu código para adequar o princípio de operação dos motores ao sistema de movimentação Core-XY. Essas alterações devem ser feitas antes de a compilação e não podem ser alteradas em tempo de execução do *firmware*. Para habilitar a equação de movimentação Core-XY, foi retirado o comentário da linha 189 do arquivo fonte “config.h”, a Figura 35 ilustra essa alteração.

Figura 35 – Habilitar a cinemática Core-XY.

```

186 // defined at (http://corexy.com/theory.html). Motors are assumed to be positioned and wired exactly as
187 // described, if not, motions may move in strange directions. Grbl requires the CoreXY A and B motors
188 // have the same steps per mm internally.
189 #define COREXY // Default disabled. Uncomment to enable. Linha comentada
190
191 // Inverts pin logic of the control command pins based on a mask. This essentially means you can use
  
```

```

186 // defined at (http://corexy.com/theory.html). Motors are assumed to be positioned and wired exactly as
187 // described, if not, motions may move in strange directions. Grbl requires the CoreXY A and B motors
188 // have the same steps per mm internally.
189 #define COREXY // Default disabled. Uncomment to enable. Linha descomentada
190
191 // Inverts pin logic of the control command pins based on a mask. This essentially means you can use
  
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

O ciclo de *homing* deve ser configurado para a cinemática Core-XY, para isso foi retirado o comentário das linhas 112 e 113 e foi comentado as linhas 105 e 106 do arquivo fonte “config.h”, a Figura 36 ilustra essa alteração.

Figura 36 – Habilitar o ciclo de *homing* Core-XY.

```

103 // will not be affected by pin sharing.
104 // NOTE: Defaults are set for a traditional 3-axis CNC machine. Z-axis first to clear, followed by X & Y.
105 #define HOMING_CYCLE_0 (1<<Z_AXIS) // REQUIRED: First move Z to clear workspace.
106 #define HOMING_CYCLE_1 ((1<<X_AXIS)|(1<<Y_AXIS)) // OPTIONAL: Then move X,Y at the same time.
107 // #define HOMING_CYCLE_2 // OPTIONAL: Uncomment and add axes mask to enable
108
109 // NOTE: The following are two examples to setup homing for 2-axis machines.
110 // #define HOMING_CYCLE_0 ((1<<X_AXIS)|(1<<Y_AXIS)) // NOT COMPATIBLE WITH COREXY: Homes both X-Y in one cycle.
111
112 // #define HOMING_CYCLE_0 (1<<X_AXIS) // COREXY COMPATIBLE: First home X
113 // #define HOMING_CYCLE_1 (1<<Y_AXIS) // COREXY COMPATIBLE: Then home Y
114
115 // Number of homing cycles performed after when the machine initially jogs to limit switches.
  
```

```

103 // will not be affected by pin sharing.
104 // NOTE: Defaults are set for a traditional 3-axis CNC machine. Z-axis first to clear, followed by X & Y.
105 // #define HOMING_CYCLE_0 (1<<Z_AXIS) // REQUIRED: First move Z to clear workspace.
106 // #define HOMING_CYCLE_1 ((1<<X_AXIS)|(1<<Y_AXIS)) // OPTIONAL: Then move X,Y at the same time.
107 // #define HOMING_CYCLE_2 // OPTIONAL: Uncomment and add axes mask to enable
108
109 // NOTE: The following are two examples to setup homing for 2-axis machines.
110 // #define HOMING_CYCLE_0 ((1<<X_AXIS)|(1<<Y_AXIS)) // NOT COMPATIBLE WITH COREXY: Homes both X-Y in one cycle.
111
112 #define HOMING_CYCLE_0 (1<<X_AXIS) // COREXY COMPATIBLE: First home X
113 #define HOMING_CYCLE_1 (1<<Y_AXIS) // COREXY COMPATIBLE: Then home Y
114
115 // Number of homing cycles performed after when the machine initially jogs to limit switches.
  
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

2) As instruções em detalhes para compilar e instalar o Grbl estão disponíveis no sítio *web* do desenvolvedor¹¹. Essas instruções estão detalhadas conforme o sistema operacional utilizado, o Grbl é um projeto *opensource* e está em constante desenvolvimento e sujeito a modificações.

A versão compilada do Grbl foi a v1.1f, após a instalação, foi estabelecida uma conexão com o Grbl através de um programa de terminal serial, onde foi enviado o comando **\$\$**. O Grbl deve responder com uma lista contendo as configurações atuais do sistema, essas configurações são mantidas em memória EEPROM. Essa memória é do tipo não-volátil e as informações contidas nela são mantidas, mesmo após desligar o Arduino Uno Rev3. Cada configuração está contida em um formato semelhante a **\$x=val**, onde **x** indica uma configuração específica, enquanto **val** é o valor da configuração. O comando **\$x=val** salva ou altera uma configuração no Grbl, o mesmo responderá com um “ok” se tudo ocorrer bem sinalizando que a configuração foi persistida na EEPROM.

3) Calcular a quantidade de passos que cada eixo deve dar para percorrer um milímetro, esse cálculo é dado pela Fórmula 3.3.¹²

$$passos/mm = \frac{Micropassos \times 1 Rev. motor}{Passo correia \times N dentes polia} \quad (3.3)$$

Onde:

Micropassos = É a resolução de micropassos conforme definido na Seção 3.3.1, com base na Tabela 3 foi escolhido 1/16 micropassos, para o cálculo é utilizado apenas o denominador 16.

Rev. Motor = É a quantidade de passos que o motor faz em uma revolução, conforme definido na Seção 3.2.1 o menor deslocamento angular do motor é de 1,8°, uma revolução tem 360°, então $\frac{360}{1,8} = 200$.

Passo correia = É a distância entre os dentes da correia em milímetros, conforme definido na Seção 3.1.5 o passo da correia usada é de 2 mm.

N dentes polia = É o número de dentes da polia, conforme definido na Seção 3.1.4 o número de dentes da polia dentada usada no motor é 20.

Aplicando os valores a fórmula: $\frac{16 \times 200}{2 \times 20} = \frac{3200}{40} = 80$.

O comando **\$100=80** salva a quantidade de micropassos que o eixo X deve dar para percorrer um milímetro, **\$101=80** salva a quantidade de micropassos para o eixo Y na memória do Grbl.

É possível calcular a resolução dos passos, ou seja quantos milímetros cada

¹¹ Disponível em: <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Compiling-Grbl>. Acesso em: 26 abr. 2019.

¹² Disponível em: https://reprap.org/wiki/Triffid_Hunter%27s_Calibration_Guide#XY_steps. Acesso em: 26 abr. 2019.

passo se desloca, esse cálculo é dado pela Fórmula 3.4:¹³

$$resolucao = \frac{\left(\frac{Rev. polia}{Rev. motor} \right)}{Micropassos} \quad (3.4)$$

Onde:

Rev. polia = É a quantidades em milímetros que a polia se desloca em uma revolução, conforme definido na Seção 3.1.4 o número de dentes da polia dentada usada no motor é 20, seu passo é de 2 mm, então $2 \times 20 = 40$.

Rev. Motor = É a quantidade de passos que o motor faz em uma revolução, conforme definido na Seção 3.2.1 o menor deslocamento angular do motor é de $1,8^\circ$, uma revolução tem 360° , então $\frac{360}{1,8} = 200$.

Micropassos = É a resolução de micropassos conforme definido na Seção 3.3.1, com base na Tabela 3 foi escolhido 1/16 micropassos, para o cálculo é utilizado apenas o denominador 16.

Aplicando os valores a fórmula: $(40/20)/16 = 0,0125 \text{ mm}$ ou 1,25 centésimos de milímetros de resolução, esse valor corresponde ao menor valor de deslocamento nos eixos X e Y do protótipo.

- 4) Os motores são controlados por um sistema de malha aberta, isso significa que o sistema eletrônico não tem como inferir a sua posição atual. Para um sistema de coordenadas absolutas conforme definido na Seção 3.1.1, determinar o ponto inicial (zero) é necessário para que a máquina possa saber a sua localização atual. O ciclo de *homing* é usado para localizar e estabelecer com precisão uma posição conhecida como posição inicial ou ponto zero. Por padrão o ciclo de *homing* está desabilitado no Grbl, para ativar essa função os eixos devem estar corretamente configurados como descrito na Etapa 1 dessa seção.

Foi enviado o comando **\$22=1** para ativar o *homing* do Grbl, após a ativação é necessário determinar a direção do ciclo de *homing*, os possíveis valores para essa configuração são:

\$23=0 Canto superior direito (configuração padrão)

\$3=21 Canto superior esquerdo

\$23=2 Canto inferior direito

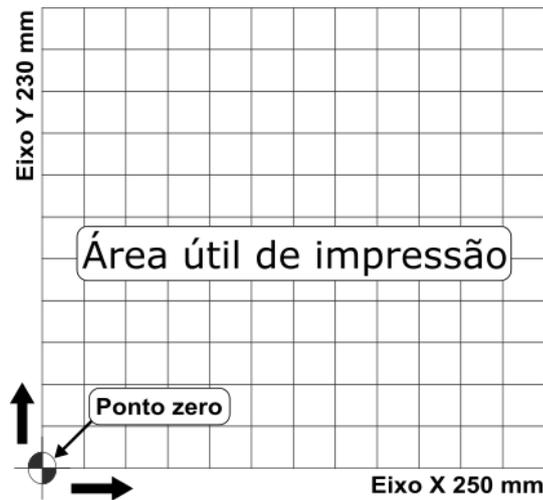
\$23=3 Canto inferior esquerdo

\$23=4 Definido pelo motor (*spindle*)

O comando enviado para determinar a direção do ciclo de *homing* foi o **\$23=3**, ficando estabelecido o canto inferior esquerdo como ponto zero do protótipo. A Figura 37 ilustra a localização do ponto zero na área útil de trabalho da máquina.

¹³ Disponível em: https://reprap.org/wiki/Triffid_Hunter%27s_Calibration_Guide#XY_steps. Acesso em: 26 abr. 2019.

Figura 37 – Área útil de impressão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O ciclo de *homing* é feito em duas fases distintas em cada eixo (XY), essas fases são de busca e avanço. Na fase de busca o Grbl está apenas tentando encontrar a chave fim de curso com a maior velocidade possível, essa velocidade é controlada em milímetros por minuto pela configuração **\$25**, ficando definido com o valor **\$25=9000**. Após a fase de busca, entra a fase de avanço, que faz exatamente a mesma coisa que a fase de busca, mas a uma velocidade mais baixa, controlada em milímetros por minuto pela configuração **\$24**, ficando definido com o valor **\$24=1200**. Esta fase é responsável em determinar com precisão o ponto de disparo da chave fim de curso. Após a fase de avanço, o eixo recua um pouco para desabilitar a chave fim de curso. Essa distância é controlada em milímetros pela configuração **\$27**, ficando definido com o valor **\$27=5**. O valor configurado deve ser alto o suficiente para desabilitar a chave fim de curso.

O Grbl desistirá de procurar a chave fim de curso após percorrer uma vez e meia a distância máxima de deslocamento definida por eixo. Essa distância define a área útil da máquina e deve ser configurada por eixo conforme definido na Seção 3.1.1 e ilustrado na Figura 37.

A distância máxima de deslocamento em milímetros para o eixo X é controlada pela configuração **\$130**, ficando definida com o valor **\$130=250**. Para o eixo Y a distância máxima em milímetros é controlada pela configuração **\$131**, ficando definido com o valor **\$131=230**. Esses números também são usados para limites de *firmware*, quando ativado pela configuração **\$20** e devem ser definidos respeitando o comprimento de seus eixos. O ciclo de *homing* pode ser acionado manualmente apenas entrando com o comando **\$H** no terminal serial.

5) Quando o modo *laser* está habilitado, o Grbl controla a potência do *laser* variando a tensão através de modulação PWM na porta digital 11 do microcontrolador. O valor 0 V é interpretado como desativado, enquanto 5 V é ligado. As tensões de saída intermediárias também são consideradas lineares com a potência do *laser*, ou seja, 2,5 V corresponde a 50% da potência do *laser*. A configuração **\$32** é responsável pelo modo *laser* do Grbl, e foi definida com o valor **\$32=1**, esse valor habilita o modo *laser*.

O *laser* pode ser acionado com os comandos de código G **M3** (modo de potência constante) e **M4** (modo de potência dinâmica). Cada comando aciona de forma diferente o *laser*:

M3 O modo de potência constante, simplesmente mantém a potência do *laser* conforme programado, independentemente da máquina estar se movendo, acelerando ou parando. Isso proporciona apenas o controle de ligar e desligar do *laser*.

M4 O modo de potência dinâmico, ajusta automaticamente a potência do *laser* com base na velocidade programada pela máquina. Essencialmente, garante que a quantidade de energia do *laser* seja proporcional a velocidade de movimento da máquina. Geralmente, é executado de forma rápida e quando não está em movimento o *laser* sempre permanece desligado e só liga quando a máquina se move, tornando mais segura a operação do *laser*.

Após essas etapas mínimas de configurações do Grbl, o protótipo ficou pronto para a execução dos testes. Todas as configurações utilizadas no protótipo podem ser encontradas no Apêndice B.

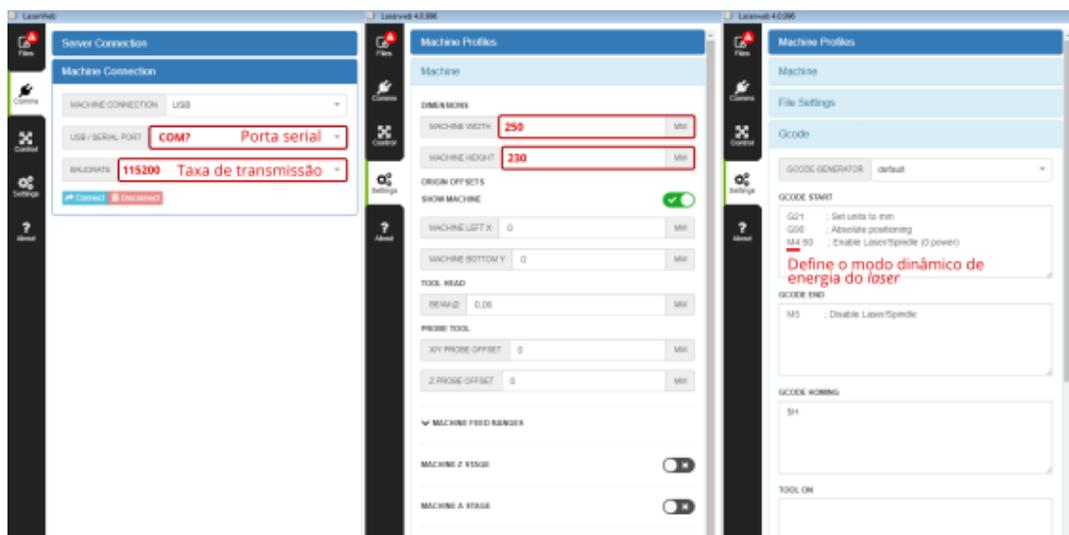
3.3.3 Software

O *software* de controle utilizado foi o LaserWeb¹⁴, uma aplicação de código fonte aberto desenvolvida em JavaScript para gerar G-Code a partir de arquivos DXF, SVG, BITMAP, JPG e PNG para *Lasers* e CNC. Foi lançado sob a licença AGPLv3¹⁵. Tem suporte para todas as funcionalidades do Grbl v1.1f. A versão utilizada foi a v4.0.996-134, sendo necessário apenas algumas configurações para o programa se comunicar com o Grbl. A Figura 38 ilustra as configurações.

¹⁴ Disponível em: <https://laserweb.yurl.ch>. Acesso em: 26 abr. 2019.

¹⁵ Disponível em: <https://www.gnu.org/licenses/agpl-3.0.pt-br.html>. Acesso em: 26 abr. 2019.

Figura 38 – Configurações do LaserWeb.



Fonte: Elaborada pelo autor.

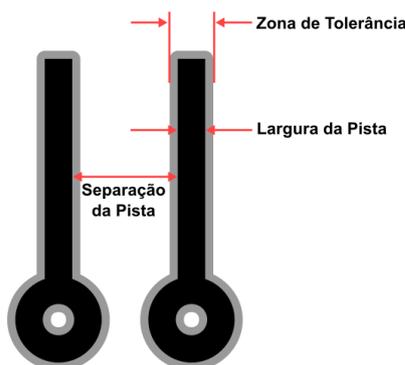
O primeiro passo é fazer a escolha da porta serial a qual o Arduino Uno Rev3 está conectada, como a taxa de transmissão padrão do Grbl é 115200, a mesma deve ser selecionada no programa. O segundo passo é informar a largura de 250 mm e altura de 230 mm da máquina, conforme definido na Seção 3.1.1. Outro ponto importante, é informar ao programa como acionar o *laser*, no caso do protótipo, o modo de acionamento é dado pelo comando **M4** conforme explicado na etapa 5 da Seção 3.3.2.1. Esse modo, aciona o *laser* de forma dinâmica, ajustando a sua potência conforme a velocidade da máquina.

3.4 Teste de capacidade

Essa etapa irá descrever toda a metodologia dos testes, a qual foi usada nos ensaios, a metodologia escolhida foi baseada na norma da ABNT NBR IEC 62326-4-1. Essa norma é responsável pelo teste de capacidade, a capacidade define o quanto um processo é capaz de atender sob controle, limites pré estabelecidos. No caso da NBR IEC 62326-4-1 esses limites são específicos para produção de PCIs.

A norma descreve os testes de todo o processo de produção da PCI. Entretanto, o objetivo desse trabalho é testar a eficiência e a qualidade de uso, do LDI com um sistema de movimentação CNC cartesiano no processo de produção de PCI. Essa eficiência se limitará na área de atuação do LDI, como descrito na Seção 2.4 e ilustrado na Figura 10. Dentre os testes de capacidade descritos pela norma, existem testes que determinam a largura e espaçamento das pistas, os quais são adotados para os ensaios. Os testes irão determinar a largura mínima das pistas, e espaçamento mínimo entre as pistas, respeitando a zona de tolerância determinada pela norma. A Figura 39 ilustra a delimitação do teste de capacidade.

Figura 39 – Delimitação do teste de capacidade.

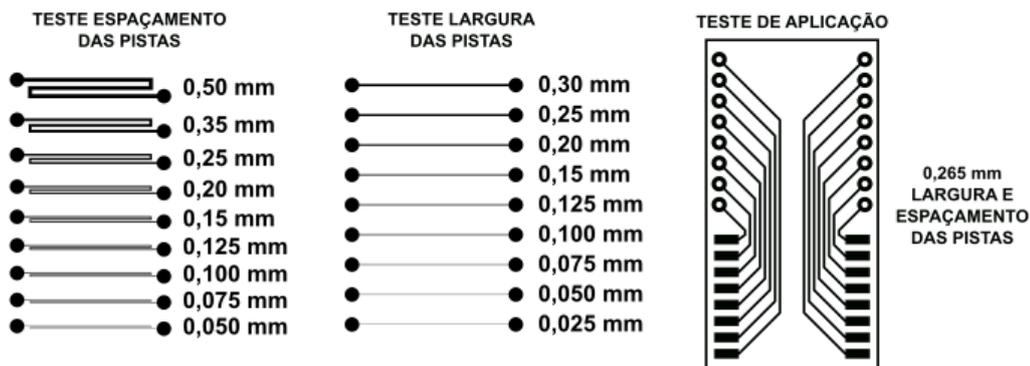


Fonte: Elaborada pelo autor com base na norma NBR IEC 62326-4-1.

Para a aplicação dos testes a norma NBR IEC 62326-4-1 determina que seja produzido cupons de ensaio. Esses cupons de ensaio devem atender aos requisitos que estão descritos na seção 12 da norma NBR IEC 62326-4:2007 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007b). A qual, é indispensável para a aplicação do teste de capacidade. A norma especifica a constituição do cupom de ensaio individual. Essa constituição deve atender os seguintes requisitos: Ser uma parte do traçado condutor contínuo em uma Placa Impressa de Produção (PIP) ou um traçado de ensaio especialmente projetado e preparado somente para finalidade de ensaio.

Conforme a norma determina, os cupons de ensaio foram projetados apenas para algumas finalidades específicas, que são: determinar a largura e a separação mínima das pistas. No entanto, foi desenvolvido um cupom de ensaio adicional, apenas para um teste de aplicação real de um circuito completo. O qual, tem apenas a finalidade de um teste para aplicação prática, estando fora do escopo dos testes de capacidade, mas mantendo a metodologia do teste de capacidade. A Figura 40 ilustra o desenho dos traçados para os testes de espaçamento, largura e aplicação.

Figura 40 – Desenho do traçado para testes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como observado na Figura 40, os traçados correspondentes a espaçamento das pistas e largura das pistas, estão divididos em nove níveis, cada nível com um valor determinado. Esses valores representam o grau de capacidade do produto de acordo com a norma NBR IEC 62326-4-1 seção 3.2. O grau de capacidade do produto pode variar de 1 a 9, conforme a Figura 41, a qual foi retirada da tabela 2 seção 3.2 da norma.

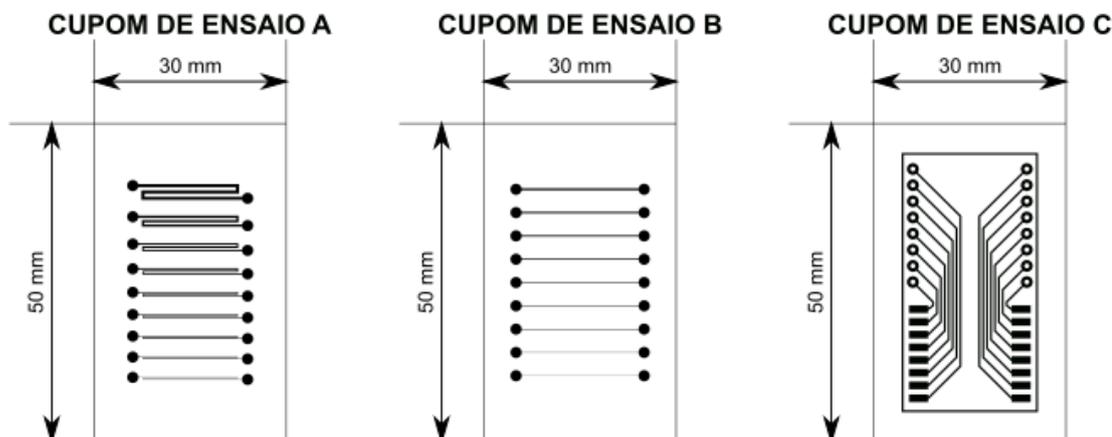
Figura 41 – Capacidade do produto.

P I S T A S	Critérios		Cod.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Metalizadas (Camada Externa)	Separação mínima	mm	D	≥0,50	0,35	0,25	0,20	0,15	0,125	0,100	0,075
Largura mínima		mm	≥0,30		0,25	0,20	0,15	0,125	0,100	0,075	0,050	< 0,050
Tolerância de processo		mm	≥0,15		0,10	0,075	0,05	0,04	0,03	0,025	0,020	<0,020

Fonte: Adaptada de NBR IEC 62326-4-1 (2007, p. 3)

O desenho do traçado da Figura 40, foi desenvolvido apenas para finalidade específica de determinar o grau de capacidade do produto, considerando apenas os critérios que são avaliados no escopo desse estudo. A Figura 42 ilustra os Cupons Individuais de Ensaio (CIE) com as suas dimensões, a folha completa com os cupons individuais de ensaio pode ser encontrada no Apêndice C.

Figura 42 – Cupons Individuais de Ensaio (CIE).



Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com a seção 3 da norma NBR IEC 62326-4-1. Os cupons de ensaio devem atender às seguintes condições: ser feitos em um dos materiais-base revestidos de cobre e uma das folhas adesivas especificadas de acordo com a tabela 1 da norma. A qual, é responsável pela especificação dos materiais. Para os ensaios desse estudo, o material-base utilizado conforme a tabela 1 da norma citada, foi o M1. Sendo esse material constituído de resina fenólica rígida de face simples sem conexões entre as camadas.

A seção 3.3 da norma NBR IEC 62326-4-1, descreve que nem todos os processos necessitam ser utilizados somente para produzir um Componente de Qualificação de Capabilidade (CQC). No entanto, para obter a aprovação para uma capacidade de processo pretendida, todos os processos devem estar disponíveis para verificação.

O CQC deve ser produzido de acordo com um ou mais dos processos, os dados dos processos estão disponíveis na tabela 3 seção 3.3 da norma. Para produzir o CQC dos ensaios, os processos foram definidos apenas dentro do escopo desse estudo, que se restringe a ferramentas e imagem primária de acordo com a norma. Os processos foram definidos como:

- Técnica fotográfica: Código 4 - Geração via fotopltagem em revestimento polimérico em filme líquido (fotoprocessado).
- Dados eletrônicos: Código 2 - Dados via CAD e CAM (eletrônicos).
- Transferência de imagem: Código 4 - Imagem direta.

A seção 5.5.2 da norma NBR IEC 62326-1:2007 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007a). A qual é indispensável para a avaliação de

capabilidade, define que uma ou mais Placas de Avaliação de Capabilidade (PAC) contendo Cupons Individuais de Ensaio (CIE) devem ser produzidos para os testes. Para cada teste desse estudo, foram realizados dois ensaios, estando de acordo com o que rege a norma.

Para avaliação dos resultados foram utilizados o exame visual e dimensional (não-destrutivo) dos ensaios. A seção 6 da NBR IEC 62326-4:2007 descreve a sequência de avaliação dos ensaios em grupos, dentre eles foram utilizados somente alguns itens contidos no grupo 2, que são:

- D5.1: Exame dimensional da largura dos condutores nas camadas externas.
- D6.1: Exame dimensional do espaçamento entre condutores em camadas externas.

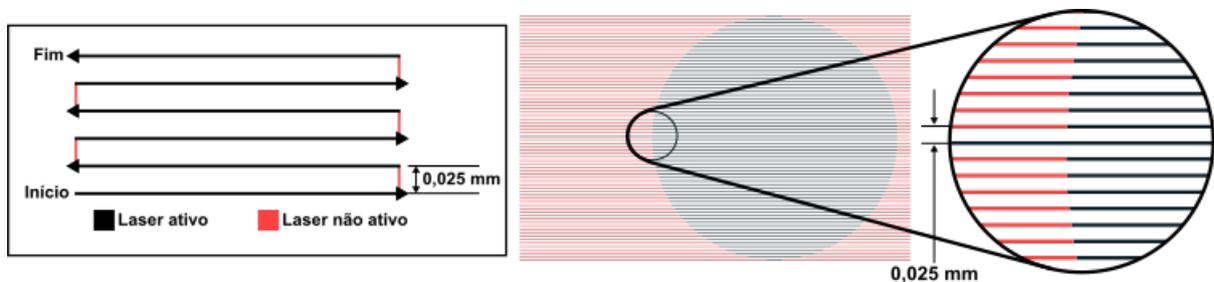
A ferramenta utilizada para avaliação visual e dimensional dos resultados foi um *software* de domínio público chamado ImageJ¹⁶. Uma ferramenta desenvolvida no *National Institutes of Health* (Institutos Nacionais da Saúde), sendo um *software* dedicado a tratamento e análise de imagens em diversas áreas de pesquisa.

¹⁶ Disponível em: <https://imagej.nih.gov/ij>. Acesso em: 26 abr. 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para garantir a execução dos ensaios, o protótipo deve atender aos requisitos dimensionais dos testes. A tecnologia do LDI efetua a transferência da imagem utilizando o sistema de varredura de linhas. No entanto, o que determina os requisitos dimensionais de transferência da imagem, é o sistema de movimentação do feixe de *laser*. Como a menor distância a ser mensurada nos testes é de 0,025 mm, o sistema de movimentação deve atender a esse requisito mínimo. A Figura 43 ilustra o funcionamento do sistema de varredura de linhas, onde é possível observar o funcionamento do feixe de *laser* nesse processo.

Figura 43 – Sistema de varredura de linhas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 43 ilustra o espaçamento mínimo que cada linha deve ter, esse espaçamento é garantido com base na resolução de passos em milímetros do protótipo, essa resolução foi calculada na etapa 3 da Seção 3.3.2.1. Onde ficou definido uma resolução de 0,0125 mm, sendo o menor valor de deslocamento por eixo do protótipo.

No entanto, os micropassos não são sempre garantidos em sistemas de movimentação sujeitos a inércia, a aceleração de massa e o atrito mecânico na pré-carga do movimento pode provocar a perda de passos (MICROMO, 2017a; MICROMO, 2017b).

As imagens dos ensaios foram obtidas através de uma mesa digitalizadora (*scanner*) da marca HP série PSC 1410, a resolução das imagens digitalizadas foi de 2400 DPI. A mesa digitalizadora tem sua área de digitalização plana, sendo ideal para captura de imagens livres de distorções ópticas, também conhecidas como distorções geométricas. Essas distorções poderiam comprometer a avaliação visual e dimensional dos resultados.

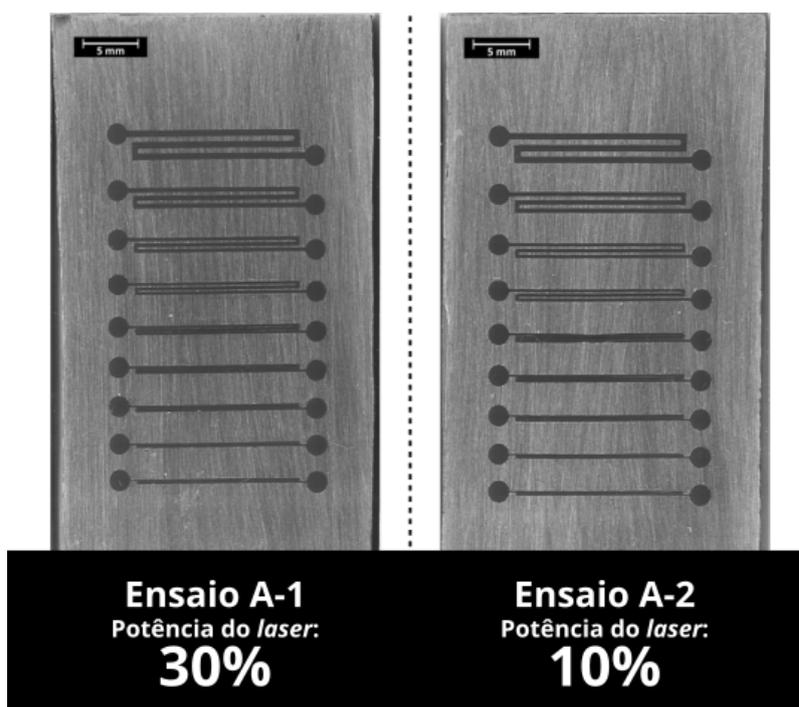
Para o teste realizado no cupom individual de ensaio A, foram utilizadas as seguintes configurações no protótipo:

- Velocidade: 6000 mm/min
- Potência do *laser*: 30% e 10%

- Espaçamento entre linhas: 0,025 mm

As Figuras 44 à 53 apresentam o resultado das placas obtidas com o cupom individual de ensaio A. O tempo de transferência com o protótipo de cada imagem foi de 5 minutos e 31 segundos.

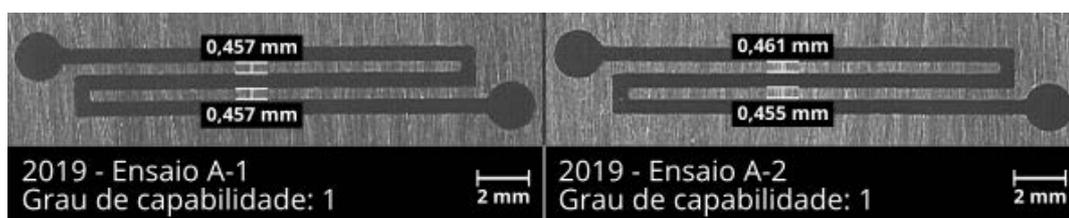
Figura 44 – Resultados do cupom individual de ensaio A.



Fonte: Elaborada pelo autor.

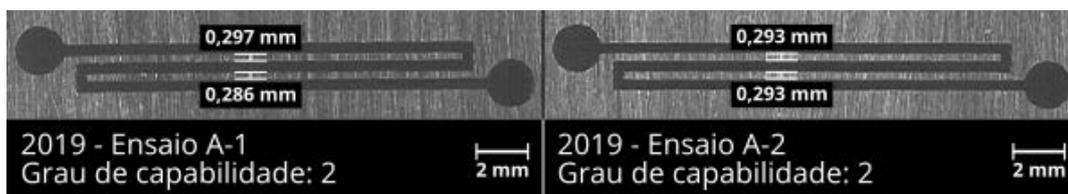
Para o primeiro teste foi variado apenas a intensidade do *laser*, o tempo de revelação da máscara foi mantida em 5 minutos para ambos os ensaios. Segue abaixo os exames visuais e dimensionais dos resultados de acordo com o seu Grau de Capabilidade (GP):

Figura 45 – Resultado ensaio A - Grau de capabilidade 1.



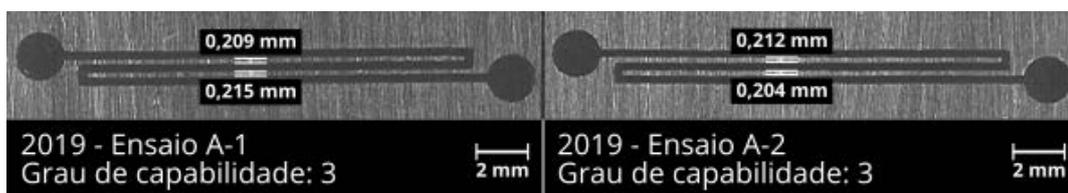
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 2



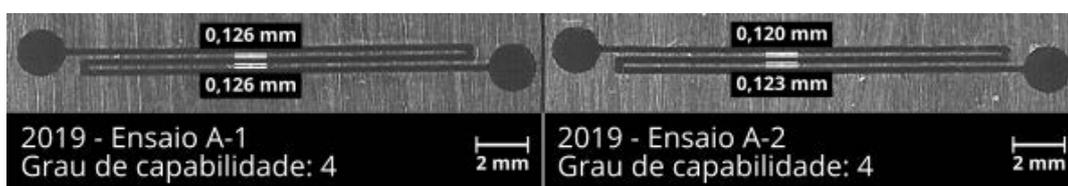
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 3.



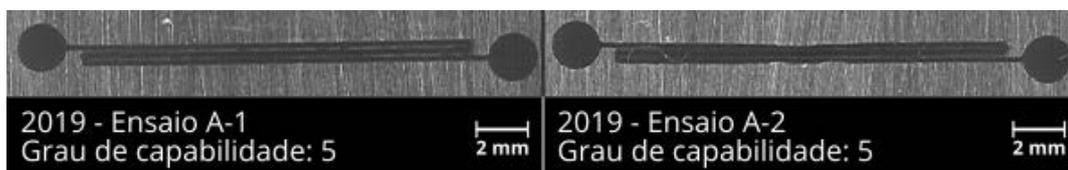
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 4.



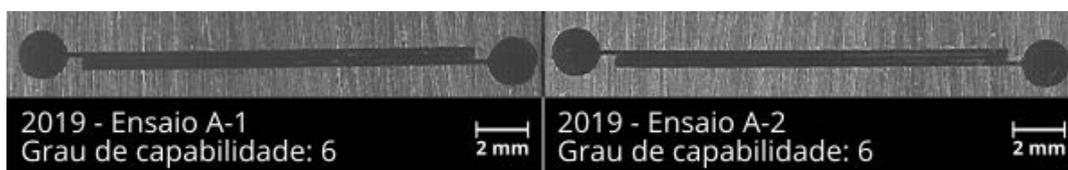
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 49 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 5.



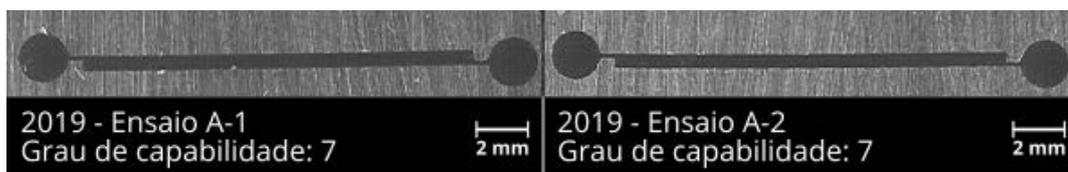
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 6.



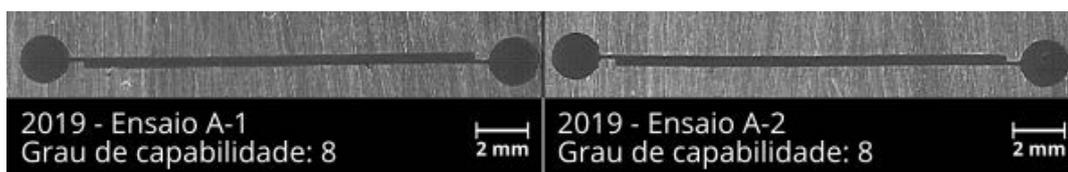
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 51 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 7.



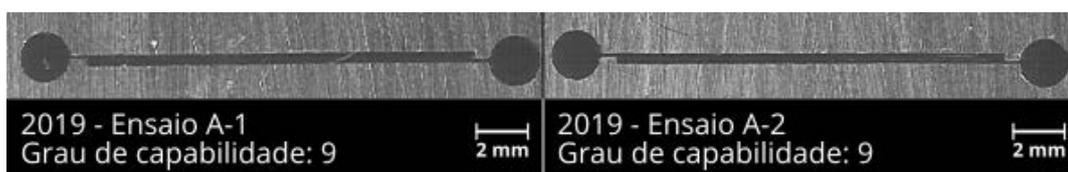
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 8.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 – Resultado ensaio A - Grau de capacidade 9.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Resultado do grau de capacidade do ensaio A.

Ensaio A	A-1 mm	A-2 mm	Esperado mm	Tolerância mm	Diferença A-1 mm	Diferença A-2 mm	Resultado
GP-1 V1	0,457	0,461	0,50	0,15	0,043	0,039	Aprovado
GP-1 V2	0,457	0,455	0,50	0,15	0,043	0,045	Aprovado
GP-2 V1	0,297	0,293	0,35	0,10	0,053	0,057	Aprovado
GP-2 V2	0,286	0,293	0,35	0,10	0,064	0,057	Aprovado

Ensaio A	A-1 mm	A-2 mm	Esperado mm	Tolerância mm	Diferença A-1 mm	Diferença A-2 mm	Resultado
GP-3 V1	0,209	0,212	0,25	0,075	0,041	0,038	Aprovado
GP-3 V2	0,215	0,204	0,25	0,075	0,035	0,045	Aprovado
GP-4 V1	0,126	0,120	0,20	0,05	0,074	0,08	Reprovado
GP-4 V2	0,126	0,123	0,20	0,05	0,074	0,077	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados contidos na Tabela 4, apresentam o grau de capacidade para o espaçamento entre condutores da camada externa, atingindo apenas o grau de número 3. O grau de número 4 não passou no nível de tolerância determinado pela norma NBR IEC 62326-4-1. Os demais graus falharam nos testes conforme as Figuras 49, 50, 51, 52 e 53.

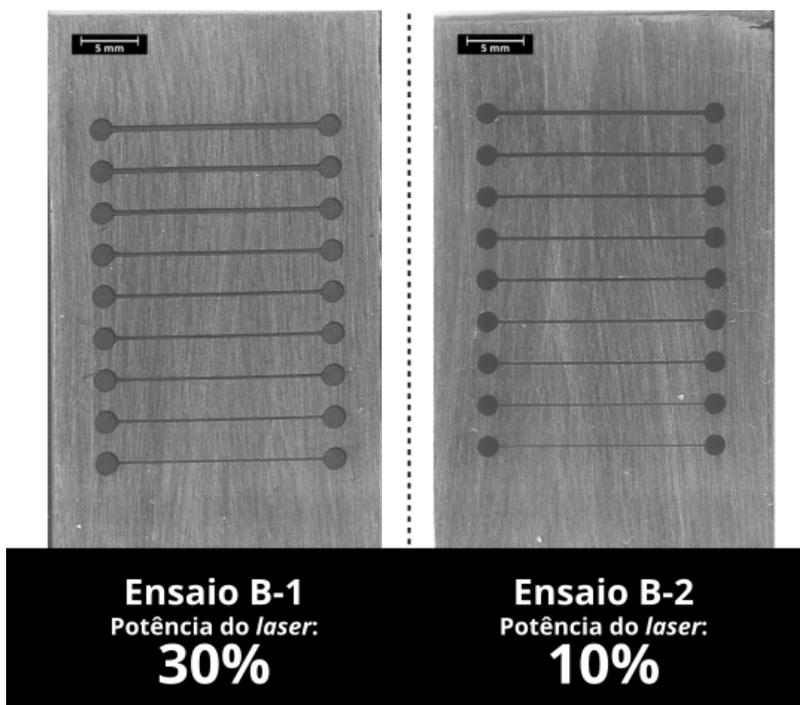
Apesar da variação da intensidade do *laser* de 30% para o ensaio A-1 e 10% para o ensaio A-2, os resultados não apresentaram diferenças significativas entre os espaçamentos. Sustentando a hipótese, que o tempo de revelação para a máscara pode atenuar a diferença de intensidade de exposição provocado pelo feixe de *laser*. No entanto, o resultado apresentado no ensaio A-2 com grau de capacidade 5, apresentou falhas em sua revelação conforme a Figura 49. O que indica, que o tempo de revelação de 5 minutos pode estar alto, sendo necessário testar com valores mais baixos.

Para o teste realizado no cupom individual de ensaio B, foram utilizadas as seguintes configurações no protótipo:

- Velocidade: 6000 mm/min
- Potência do *laser*: 30% e 10%
- Espaçamento entre linhas: 0,025 mm

As Figuras 54 à 63 apresentam o resultado das placas obtidas com o cupom individual de ensaio B. O tempo de transferência com o protótipo de cada imagem foi de 6 minutos e 12 segundos.

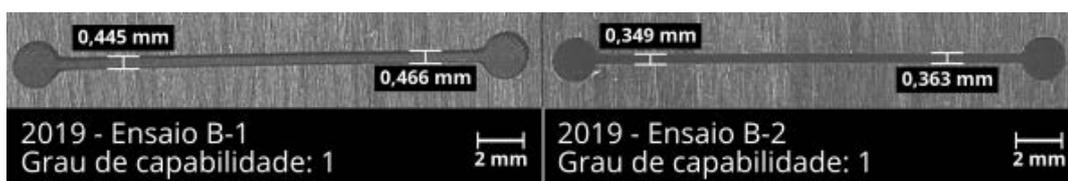
Figura 54 – Resultados do cupom individual de ensaio B.



Fonte: Elaborada pelo autor.

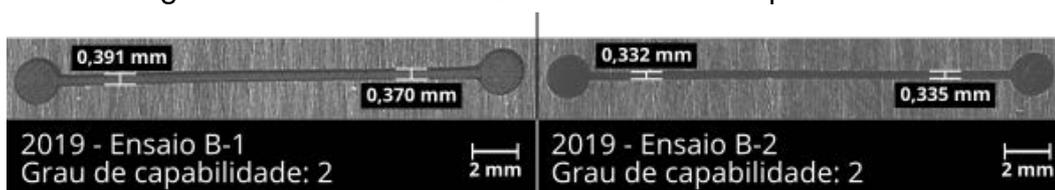
Para o segundo teste foi mantido a variação de intensidade do *laser*, mas o tempo de revelação da máscara foi alterada para 3 minutos para ambos os ensaios. Segue abaixo os exames visuais e dimensionais dos resultados de acordo com o seu Grau de Capabilidade (GP):

Figura 55 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 1.



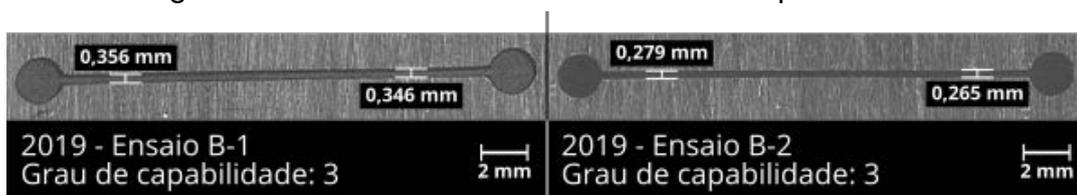
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 56 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 2.



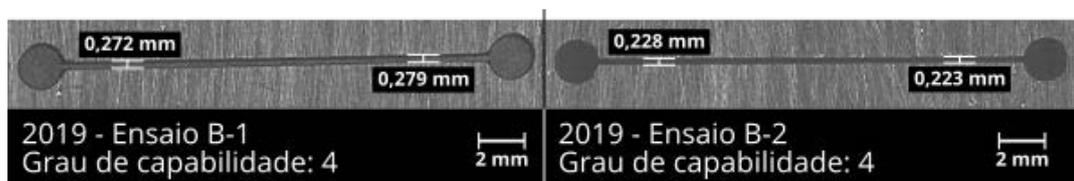
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 57 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 3.



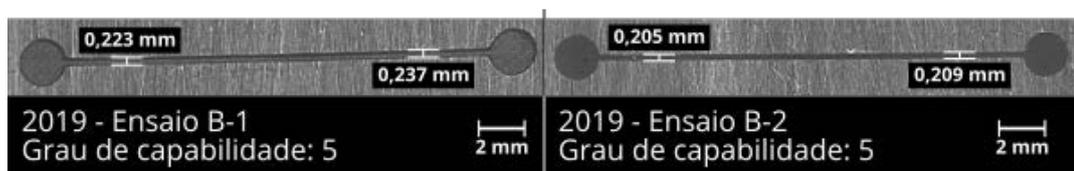
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 58 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 4.



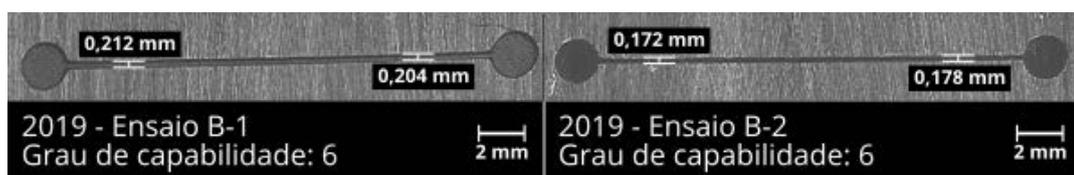
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 59 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 5.



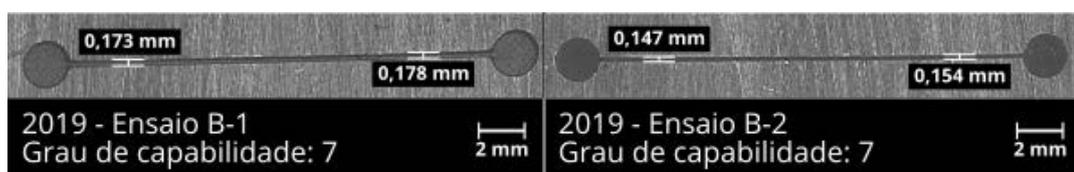
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 6.



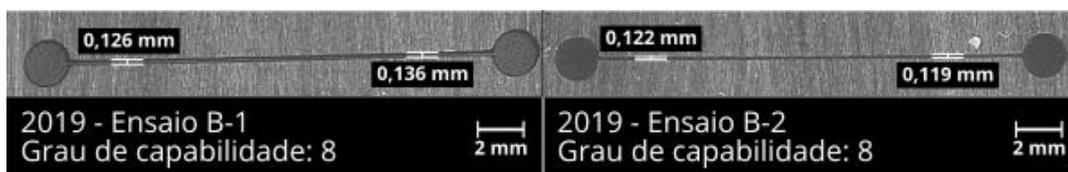
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 61 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 7.



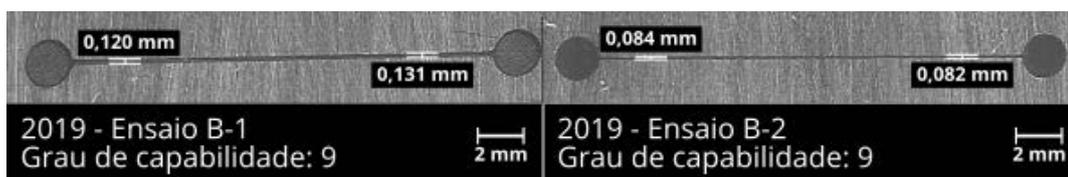
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 62 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 8.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 63 – Resultado ensaio B - Grau de capacidade 9.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Resultado do grau de capacidade do ensaio B.

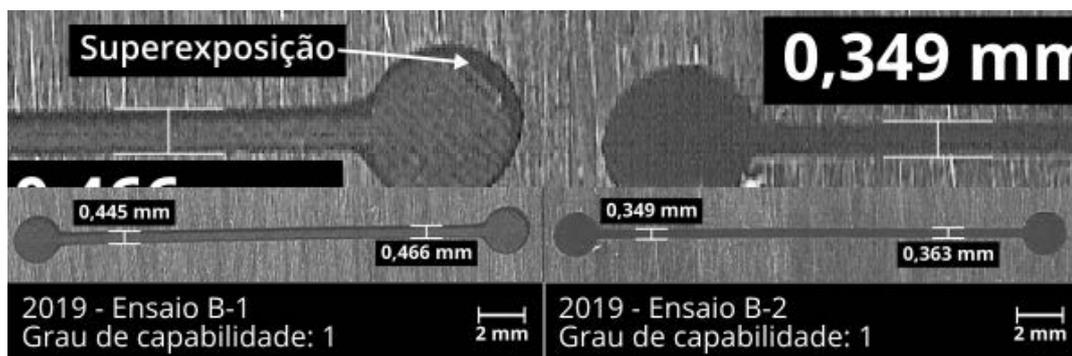
Ensaio B	B-1 mm	B-2 mm	Esperado mm	Tolerância mm	Diferença B-1 mm	Diferença B-2 mm	Resultado
GP-1 V1	0,445	0,349	0,30	0,15	0,145	0,049	Aprovado
GP-1 V2	0,466	0,363	0,30	0,15	0,166	0,063	Reprovado
GP-2 V1	0,391	0,332	0,25	0,10	0,141	0,082	Reprovado
GP-2 V2	0,370	0,335	0,25	0,10	0,12	0,085	Reprovado
GP-3 V1	0,356	0,279	0,20	0,075	0,156	0,079	Reprovado
GP-3 V2	0,346	0,265	0,20	0,075	0,146	0,065	Reprovado
GP-4 V1	0,272	0,228	0,15	0,05	0,122	0,078	Reprovado
GP-4 V2	0,279	0,223	0,15	0,05	0,129	0,073	Reprovado

Ensaio B	B-1 mm	B-2 mm	Esperado mm	Tolerância mm	Diferença B-1 mm	Diferença B-2 mm	Resultado
GP-5 V1	0,223	0,205	0,125	0,04	0,098	0,08	Reprovado
GP-5 V2	0,237	0,209	0,125	0,04	0,112	0,084	Reprovado
GP-6 V1	0,212	0,172	0,100	0,03	0,112	0,072	Reprovado
GP-6 V2	0,204	0,178	0,100	0,03	0,104	0,078	Reprovado
GP-7 V1	0,173	0,147	0,075	0,025	0,098	0,072	Reprovado
GP-7 V2	0,178	0,154	0,075	0,025	0,103	0,079	Reprovado
GP-8 V1	0,126	0,122	0,05	0,020	0,076	0,072	Reprovado
GP-8 V2	0,136	0,119	0,05	0,020	0,086	0,069	Reprovado
GP-9 V1	0,120	0,084	0,025	≤0,025	0,095	0,055	Reprovado
GP-9 V2	0,131	0,082	0,025	≤0,025	0,106	0,057	Reprovado

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados contidos na Tabela 5, apresentam o grau de capacidade da largura dos condutores na camada externa. Os resultados apontam falhas em todos os graus. Apenas o valor 1 do grau 1 (GP-1 V1) de capacidade dos testes B-1 e B-2 passaram no nível de tolerância determinado pela norma. No entanto, o valor 2 do grau 1 (GP-1 V2) do teste B-1 falhou, ocasionando a reprovação do grau 1 de capacidade.

Apesar de mantida a variação de intensidade do *laser* de 30% para o ensaio B-1 e 10% para o ensaio B-2, os resultados apresentaram diferenças significativas entre a largura dos condutores. Essas diferenças chegaram a 0,1 mm, como é o caso da linha GP-1 V2 da Tabela 5. Essas disparidades entre os valores estão associadas a redução do tempo de revelação aplicada ao ensaio B. Como o tempo de revelação foi reduzido para 3 minutos, ficou claro que o ensaio B-1 ficou superexposto com a intensidade do feixe de *laser* a 30%. Esse fato fica claro quando observado a imagem ampliada de um dos resultados do ensaio B como mostra a Figura 64.

Figura 64 – Superexposição *laser*.

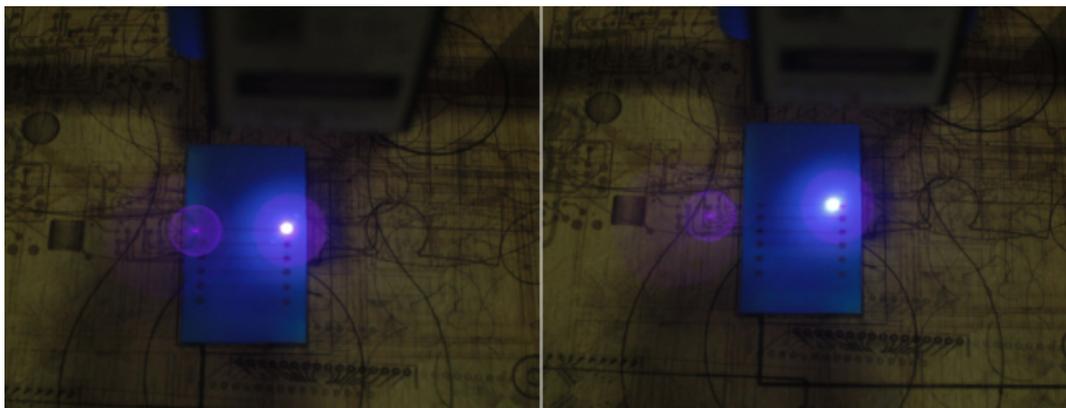
Fonte: Elaborada pelo autor.

Toda a área mais escura ao redor do desenho do traçado no ensaio B1 representa a superexposição. Confirmando a hipótese, que o tempo de revelação para a máscara pode atenuar a diferença de intensidade de exposição provocado pelo feixe de *laser*. Outro fato observado com a diminuição do tempo de revelação, foi a média da largura dos condutores que ficou muito superior aos níveis de tolerância da norma. Ficando em média 180% acima para o ensaio B-1 e 89% para o ensaio B-2.

O tempo de revelação tem um fator determinante para o processo, no entanto, essa etapa não faz parte do processo coberto pelo LDI. A Figura 10 da Seção 2.4 ilustra essa separação. A revelação da máscara do desenho é necessária para avaliação visual e dimensional dos resultados. A norma NBR IEC 62326-4-1 e seus documentos complementares não determinam como a revelação deve ser feita, ficando sob responsabilidade do fabricante deixar o processo disponível para verificação, de acordo com seção 3.3 da norma.

Para a revelação dos ensaios, foi utilizado uma solução composta de 5 g de carbonato de sódio, conhecido como barrilha leve, diluídos em 250 ml de água. A mesma solução foi utilizada em todos os testes, não havendo alteração de sua composição.

Outro fator que contribuí para o aumento significativo na largura dos condutores, é o efeito *halo*. Esse efeito provoca um arco luminoso ao redor de uma fonte de luz. Fazendo o feixe de *laser* concentrar mais energia que deveria para polimerizar o traçado do desenho. Esse efeito pode ser constatado conforme a Figura 65.

Figura 65 – Efeito *halo*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

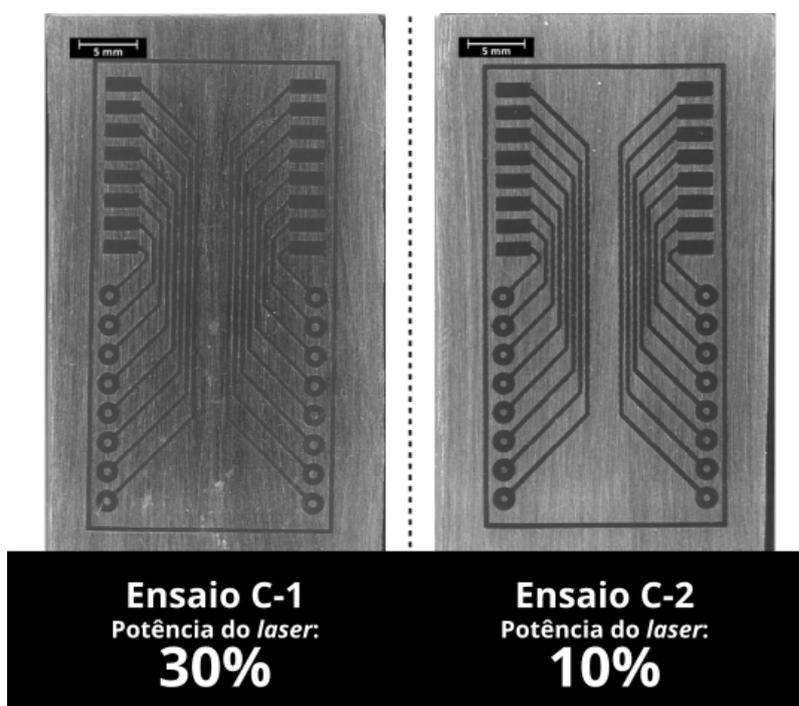
Apesar de o efeito *halo* causar aumento na largura dos condutores, o mesmo pode ter afetado os resultados obtidos no ensaio A. Os resultados que não falharam nos testes, tem em média um espaçamento entre os condutores, 27% abaixo dos níveis de tolerância da norma. O aumento da largura do traçado acabou diminuindo a largura do espaçamento entre eles. No entanto, o mesmo efeito *halo* foi responsável pela falha nos testes de grau 5 a 9 no ensaio A. Devido ao aumento na largura do traçado foi impossível fazer a revelação de suas separações.

Para o teste realizado no cupom individual de ensaio C, foram utilizadas as seguintes configurações no protótipo:

- Velocidade: 12000 mm/min
- Potência do *laser*: 30% e 10%
- Espaçamento entre linhas: 0,025 mm

As Figuras 66 e 67 apresentam o resultado das placas obtidas com o cupom individual de ensaio C. O tempo de transferência com o protótipo de cada imagem foi de 6 minutos e 42 segundos.

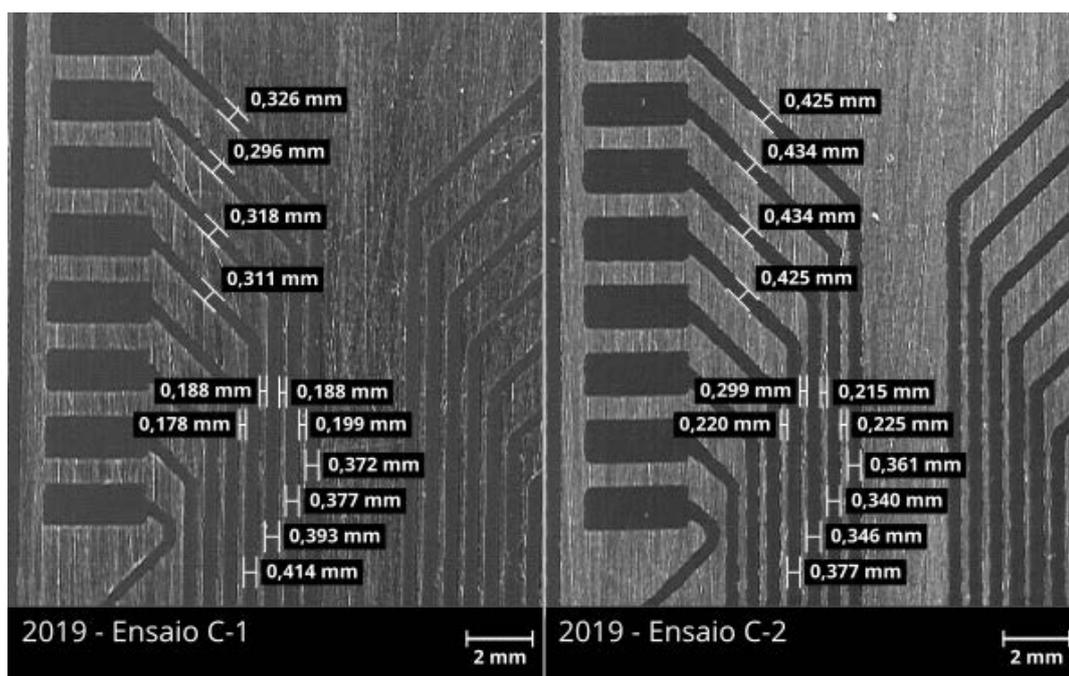
Figura 66 – Resultados do cupom individual de ensaio C.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o terceiro teste foi mantido a variação de intensidade do *laser*, porém, o tempo de revelação da máscara foi alterada para 4 minutos para ambos os ensaios. A Figura 67 apresenta os exames visuais e dimensionais dos resultados.

Figura 67 – Resultado ensaio C - Teste de Aplicação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

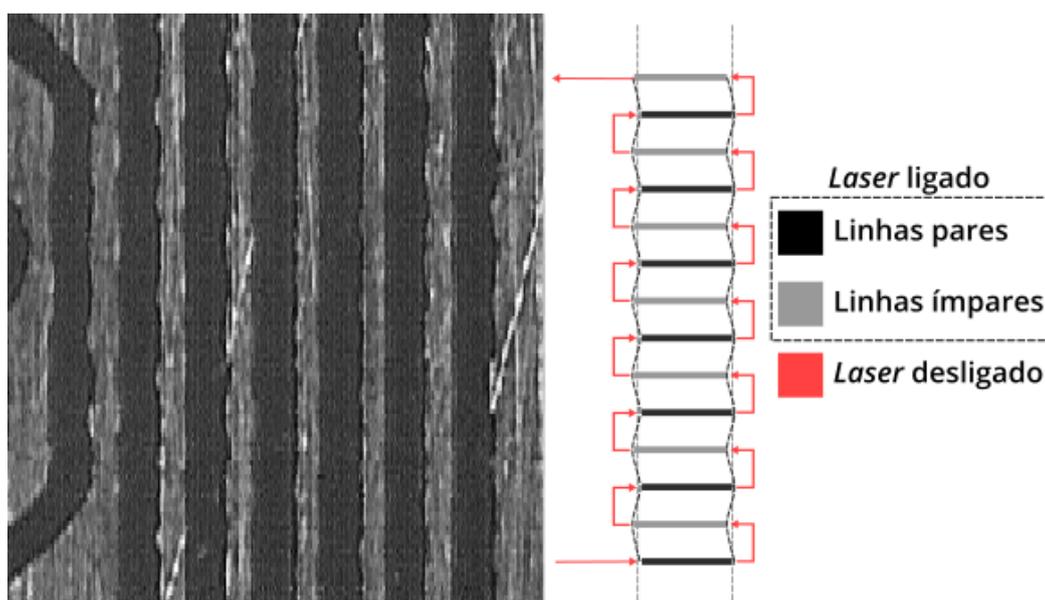
Para o ensaio C, ficou definido um valor de 0,265 mm para a largura das pistas e espaçamento entre elas. No entanto, todos os pontos medidos entre os resultados do ensaio C-1 e C-2 ficaram fora do valor esperado. Foram medidos às quatro primeiras trilhas do lado esquerdo do cupom de ensaio C.

Para as quatro medidas referentes às trilhas em diagonal, os resultados foram uma média de 0,313 mm de largura para o ensaio C-1, estando 18% acima do esperado. Enquanto o ensaio C-2 ficou com uma média de 0,430 mm, estando 62% acima do resultado esperado. Para as trilhas em vertical, os resultados foram uma média de 0,389 mm de largura para o ensaio C-1, e 0,356 mm para o ensaio C-2. Ficando respectivamente em 46,7% e 34,3% acima do resultado esperado. Para os resultados de espaçamento vertical dos condutores, o valor obtido médio foi de 0,188 mm para o ensaio C-1 e 0,215 mm para o ensaio C-2. Ficando respectivamente em 29% e 19% abaixo do resultado esperado.

Apesar de mantida a variação de intensidade do *laser* de 30% para o ensaio C-1 e 10% para o ensaio C-2, os resultados apresentaram diferenças significativas, se comparado ao esperado. Essas diferenças entre os valores podem estar associadas ao aumento de velocidade aplicado para esse ensaio. A velocidade utilizada para o ensaio foi de 12000 mm/min, sendo o dobro da velocidade usada para os ensaios A e B.

Foi notado além dos problemas de superexposição e efeito *halo*, um novo problema, o qual, apresenta ondulações nas linhas. Esse problema fica evidente quando ampliado a imagem do ensaio C-2 conforme a Figura 68.

Figura 68 – Problema de ajuste de compensação de linhas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Essas ondulações podem estar associadas com o aumento da velocidade aplicada a varredura de linhas. O desenho ao lado esquerdo da imagem na Figura

68 ilustra a possível causa do problema. O módulo de controle de disparo do *laser* utilizado no protótipo pode estar respondendo com atraso. Esse atraso mesmo na ordem de milésimos de segundo, pode gerar as ondulações apresentadas. Pelo fato do *laser* se mover em alta velocidade, paralelamente em sentidos opostos entre linhas pares e ímpares, um pequeno atraso no acionamento do *laser* pode gerar imperfeições na margem do desenho.

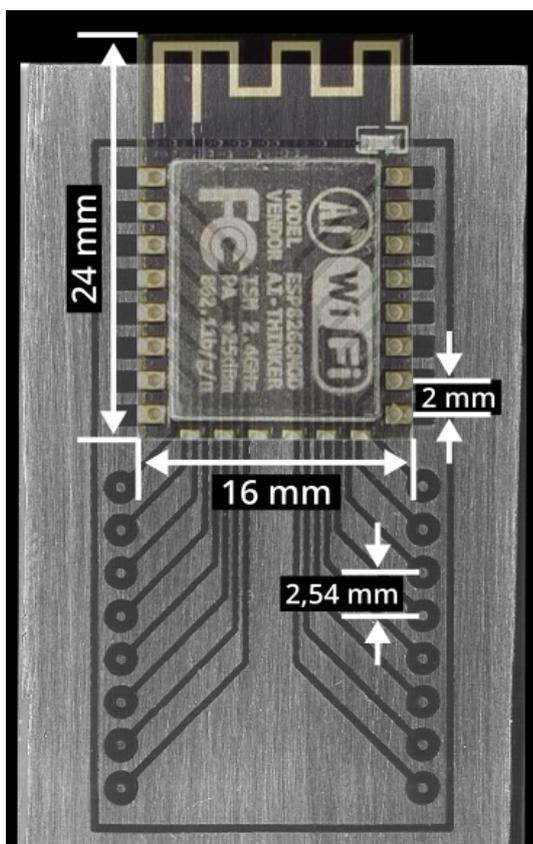
Os *firmwares* de controladoras *lasers* profissionais já efetuam essa compensação no atraso do disparo do *laser*, a qual age de forma dinâmica e proporcional a velocidade usada. No entanto, até a versão v1.1f do Grbl, *firmware* utilizado para o protótipo, essa função não existe. Outra maneira de solucionar esse problema, seria compensar o atraso do disparo do laser no G-code, através de *software*. Alguns *softwares* comerciais já implementam essa função, como é o caso do LightBurn®¹. Até a versão v4.0.996-134 do LaserWeb, *software* utilizado nos testes, essa função não está implementada.

Como o tempo de revelação foi alterado para 4 minutos, ficou claro que o ensaio B-1 ficou superexposto com a intensidade do feixe de *laser* a 30%. Esse fato fica claro quando observado a imagem do ensaio C-1 na Figura 67. Toda a área central da imagem ficou com uma tonalidade mais escura, entretanto, o tempo de revelação de 4 minutos provou ser eficiente mesmo em condições de superexposição. O qual, não apresentou falhas em sua revelação em ambos os ensaios de C.

O ensaio C não visa obter um grau de capacidade, os testes foram realizados com o objetivo de simular uma aplicação prática. Essa aplicação seria um adaptador para um pequeno microcontrolador (ESP8266 ESP-12F) frequentemente utilizado em projetos eletrônicos. O objetivo dessa simulação é adaptar o soquete do ESP-12F, o qual tem um espaçamento de 2 mm, para um soquete convencional de 2,54 mm. A Figura 69 ilustra como ficaria o microcontrolador na PCI.

¹ Disponível em: <https://github.com/LightBurnSoftware/Documentation/blob/master/ScanningOffsetAdjustment.md>. Acesso em: 26 abr. 2019.

Figura 69 – Resultado ensaio C - Adaptador ESP12f.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar dos resultados dos ensaios C-1 e C-2, não apresentarem o valor determinado, as PCIs geradas nos ensaios não apresentaram problemas, como trilhas falhadas e curto-circuito provocado pela não separação dos condutores.

5 CONCLUSÃO

O LDI é uma técnica de transferência de imagem bem estabelecida, que supera as limitações de impressão da fotolitografia. Contudo, nas últimas duas décadas o LDI tem sido amplamente estudado apenas com o sistema de movimentação galvanométrico, com foco para a indústria. A qual, enfrenta desafios cada vez mais complexos, como a miniaturização dos componentes e alta densidade de interconexões dos circuitos. Em laboratórios comuns de eletrônica, os requisitos se resumem em prototipar uma PCI com qualidade, essa qualidade pode ser obtida fazendo uso do LDI.

O estudo de caso exploratório realizado nessa pesquisa, teve como objetivo apresentar uma alternativa para facilitar a transferência do desenho do circuito para a PCI. A qual, foi estudada uma alternativa usando o LDI com o sistema de movimentação CNC cartesiano de dois eixos. Com foco no aumento da qualidade de prototipação da PCI em laboratórios de eletrônica. Visando incentivar pesquisas em projetos eletrônicos e aumentar a capacitação dos alunos nas áreas de tecnologia.

Os resultados apresentados nessa pesquisa foram baseados na norma da ABNT NBR IEC 62326-4-1, a qual é responsável pela especificação detalhada de capacidade e níveis de desempenho. Os resultados obtidos no ensaio A, atingiu o grau de capacidade 3 para espaçamento mínimo entre as pistas. Obtendo uma largura média de espaçamento de 0,210 mm onde o esperado era 0,250 mm, ficando dentro da margem de tolerância determinada pela norma, que é de 0,075 mm. Entretanto, o espaçamento mínimo alcançado nos ensaios, foi de 0,120 mm o que corresponderia ao grau de capacidade 7, o qual espera um espaçamento de 0,100 mm com tolerância de 0,025 mm.

Os resultados obtidos no ensaio B, o qual é responsável por determinar a largura mínima das pistas, apresentou falhas em todos os graus de capacidade. No entanto, a largura mínima alcançada nos ensaios foi de 0,082 mm, a qual teria um grau de capacidade 7, sendo esperado uma largura de 0,075 mm com tolerância de 0,025 mm. Obtendo o mesmo grau de capacidade para espaçamento mínimo da pista, se ambos os ensaios fossem realizados sob condições ideais de uso.

Apesar de os resultados obtidos no ensaio C, não estarem subordinados a um grau de capacidade. Os mesmos foram aplicados seguindo a metodologia da norma. No entanto, todas as medidas realizadas para determinar a largura e espaçamento das pistas, obtiveram resultados fora do esperado. Apesar de os resultados estarem fora do esperado, os mesmos não comprometeram o funcionamento da aplicação pretendida com o teste.

O diodo *laser* utilizado para os ensaios, apresentou uma boa eficiência de cura para a tinta fotossensível utilizada nos testes. Todos os resultados apresentaram uma

boa polimerização, não sendo necessário mais que 10% de sua energia. Ficando comprovado que seu comprimento de onda de 405 nm é efetivo no processo de fotopolimerização.

O sistema de movimentação utilizado no protótipo foi o Core-XY, um sistema leve e muito ágil para aplicações de dois eixos. Para ensaios A e B, foi utilizado uma velocidade de 6000 mm/min e para o ensaio C foi utilizado 12000 mm/mim. Apesar de o ensaio C apresentar problemas em seus traçados, e estes estarem relacionados a velocidade. O Core-XY não foi a causa dos problemas, e sim, o atraso no disparo do *laser* que ficou evidenciado com o aumento da velocidade. Contudo, a velocidade máxima alcançada com o protótipo foi de 20000 mm/mim, o que pode ser conferido nas configurações aplicadas ao Grbl (ver Apêndice B).

O uso do LDI foi eficaz para a transferência de imagens, conseguindo alcançar sob condições ideais a largura mínima de 0,082 mm para a pista e 0,120 mm para a separação entre as pistas. Um bom resultado se comparado com a média da largura mínima das pistas fabricadas pelas indústrias nacionais¹ que é de 0,125 mm. Com os resultados obtidos com o protótipo, ficou claro que as condições ideais para o uso do LDI com o sistema de movimentação Core-XY, é de 6000 mm/min com a potência do *laser* a 50 mW. Entretanto, o tempo de revelação da máscara tem um papel determinante no processo. De acordo com os testes, o melhor tempo para revelação foi de 4 minutos com uma solução composta de 5 g de carbonato de sódio, diluído em 250 ml de água.

Como a pesquisa usou um estudo de caso exploratório, ficou evidente alguns problemas na alternativa proposta. Esses problemas não se resumem apenas ao uso do LDI, os mesmos são enfrentados em máquinas genéricas que fazem uso de *lasers*, como máquinas de corte e gravação. Apesar de os problemas serem solucionados em máquinas de uso comercial, os mesmos ainda persistem em soluções não comerciais. Corroborando a ideia de que são necessárias novas pesquisas para solucionar esses problemas.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

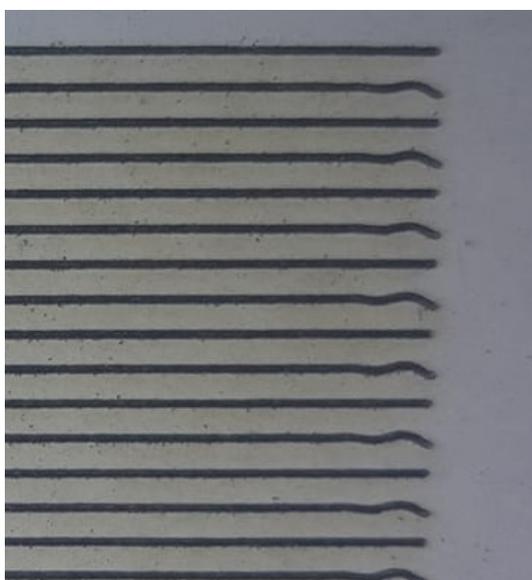
Durante o desenvolvimento dessa pesquisa, alguns desafios foram notados. Esses desafios se superados podem aumentar a eficiência de máquinas que fazem uso de *lasers* com sistemas de movimentação CNC.

¹ A largura mínima da trilha depende do processo de fabricação utilizado. Os valores citados são usuais nos prestadores de serviço de confecção de placas disponíveis no Brasil (ver Apêndice A).

5.1.1 Diminuição da oscilação de linha na pré-carga de movimento.

A oscilação de linha é geralmente causada por uma configuração de aceleração muito alta, no entanto, esse problema é agravado quando há folgas na parte mecânica do sistema de movimentação. O rolamento linear é um exemplo de folga, essa folga pode chegar a 0,009 mm de acordo com a folha de dados de seus fabricantes. As polias e correias podem também apresentar folgas, essas folgas podem resultar em pequenas oscilações na pré-carga do movimento. Como resultado o início das linhas podem apresenta pequenas ondulações, essas ondulações podem ser vistas conforme a Figura 70.

Figura 70 – Problema de oscilação de linha na pré-carga de movimento.

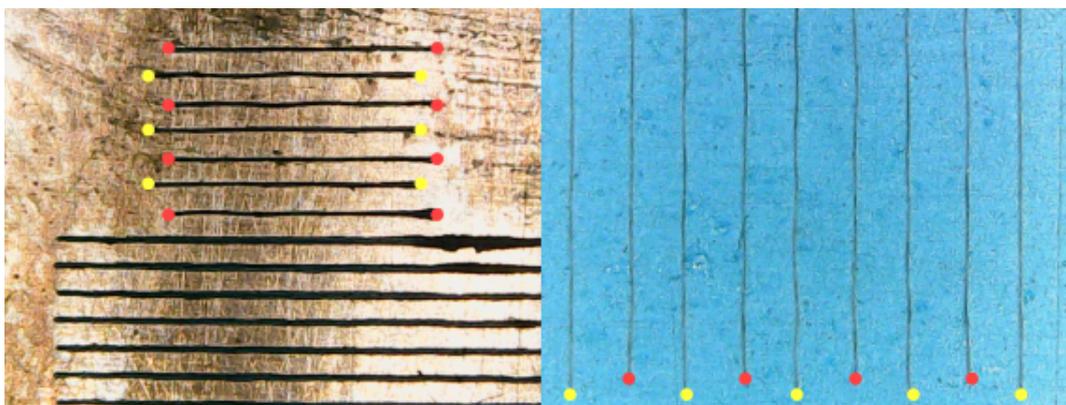


Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.2 Ajuste de compensação de linhas

O sistema de posicionamento do *laser* pode se mover muito rapidamente e com notável precisão, no entanto, o disparo do feixe leva um tempo. Alguns módulos de controle de disparo podem responder em menos de um milissegundo, mas outros podem demorar mais. O atraso de um milésimo de segundo em baixa velocidade pode ser imperceptível na formação da imagem, mas em alta velocidade pode gerar um problema na borda da imagem. Esse problema, está relacionado ao sistema de varredura de linhas, que gera movimentos em um sentido para linhas ímpares e volta no sentido oposto para linhas pares, sendo que um pequeno atraso no acionamento do *laser* pode gerar imperfeições na margem do desenho. A Figura 71 apresenta duas imagens obtidas de microscópio exemplificando esse problema.

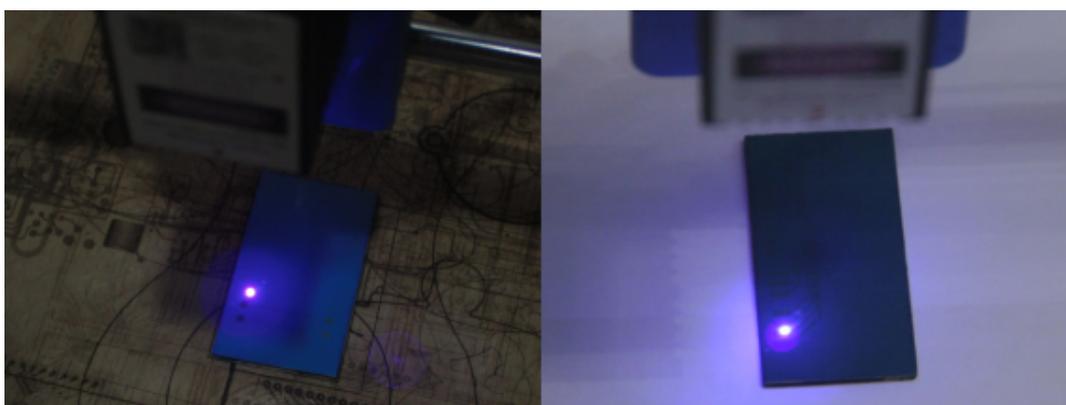
Figura 71 – Problema de ajuste de compensação de linhas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.3 Eliminar o efeito *halo*

O efeito *halo* provoca um arco luminoso ao redor de uma fonte de luz, no caso do feixe de *laser*, esse efeito acaba provocando um efeito indesejado. O qual provoca a dispersão da energia do *laser*, fazendo o foco ficar com um diâmetro acima do esperado. Para máquinas *lasers* de corte e gravação esse efeito não gera problemas. Isso porque, a energia dispersada não é suficiente para afetar o corte ou gravação, no entanto, para fotopolimerização essa dispersão de energia, acaba sendo suficiente para provocar a polimerização. Esse problema pode ser atenuado diminuindo a intensidade do *laser*, mas não completamente eliminado. A Figura 72 apresenta imagens, onde é possível observar esse efeito.

Figura 72 – Problema de efeito *halo*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

REFERÊNCIAS

- ALBIN, D.; BARCLAY, B. Soldermask laser direct imaging-an enabling technology. **Circuit World**, MCB UP Ltd, v. 29, n. 3, p. 10 – 13, 2003.
- ALLEN, N. S. **Photopolymerisation and photoimaging science and technology**. [S.l.]: Springer, 1989. ISBN 978-94-009-1127-7.
- ALLEN, N. S. *et al.* **Current trends in the photochemistry of polymers**. London: Ellis Horwood, 1995.
- ALWALIDH, A.; SHARP, M.; FRENCH, P. Laser processing of rigid and flexible PCBs. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 58, p. 109 – 113, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 62326-1**: Especificação genérica. Rio de Janeiro, 2007a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 62326-4**: Especificação seccional. Rio de Janeiro, 2007b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 62326-4-1**: Especificação detalhada de capacidade. Rio de Janeiro, 2007c.
- BARBUCHA, R. *et al.* Laser direct imaging of the printed electrical circuits on PCB. In: **Lasers and Applications**. Warsaw, Poland: International Society for Optics and Photonics, 2005. v. 5958.
- BARBUCHA, R. *et al.* Comparison between conventional and laser method of imaging tracks on PCB. In: **Laser Technology VIII**: Applications of lasers. Szczecin, Poland: International Society for Optics and Photonics, 2007a. v. 6598.
- BARBUCHA, R. *et al.* Laser direct imaging of high density patterns on PCB covered by photoresist. In: **14th International School on Quantum Electronics**: Laser physics and applications. Sunny Beach, Bulgaria: International Society for Optics and Photonics, 2007b. v. 6604.
- BARBUCHA, R. *et al.* Laser Direct Imaging of tracks on PCB covered with laser photoresist. **TECHNICAL SCIENCES**, v. 56, n. 1, Março 2008.
- BARBUCHA, R.; MIZERACZYK, J. Recent progress in direct exposure of interconnects on PCBs. **Circuit World**, Emerald Group Publishing Limited, v. 42, n. 1, p. 42 – 47, 2016.
- BÖTTCHER, H. **Technical applications of photochemistry**: with 54 tables. [S.l.]: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1991.
- CAMILO, E. *et al.* **Propostas de design de layout da PCI para redução de curto circuito de solda a onda, para processo de montagem de placa eletrônica**. 2015. 98 p. Dissertação (Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação) — Universidade Estadual de Campinas.
- CATALINA, F.; ALLEN, N. S.; CHIRINOS-PADRON, A. Photostabilisation of Polymers. I. **Revista de Plasticos Modernos**, Revista de Plasticos Modernos, v. 42, n. 415, p. 99 – 110, 1991.

- CATALINA, F.; MARTINEZ-UTRILLA, R.; SASTRE, R. Quantitative evaluation of polymeric photosensitizers. **Polymer Bulletin**, Springer, v. 8, n. 7-8, p. 369 – 375, 1982. ISSN 1436-2449.
- CHAVAN, R. R. *et al.* Quality Control of PCB using Image Processing. **International Journal of Computer Applications**, v. 141, n. 5, p. 28 – 32, maio 2016.
- DIETLIKER, K. K. **Chemistry and Technology of UV and EB Formulation for Coating, Inks and Paints**. London: SITA Technology Ltd, 1991. v. 3. 525 p. ISBN 978-0947798161.
- DOUGANS, R. M. THE ABCS OF XY POSITIONING. **ROBOTICS AGE**, ROBOTICS AGE INC, STRAND BLDG 174 CONCORD ST, PETERBOROUGH, NH 03458, v. 7, n. 5, p. 8 – 10, 1985.
- DUPONT, F. *et al.* 355 nm UV laser patterning and post-processing of FR4 PCB for fine pitch components integration. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 100, p. 186 – 194, 2018.
- EISLER, P. **My life with the printed circuit**. [S.l.]: Lehigh University Press, 1989.
- FALCÃO, E. F. de C. A. **Modelação térmica de placas de circuito impresso**. 2014. 98 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) — Universidade do Minho.
- FOUASSIER, J. **Photoinitiation, photopolymerization, and photocuring: fundamentals and applications**. [S.l.]: Hanser, 1995.
- GAN, E. K. W.; ZHENG, H. Y.; LIM, G. C. Laser drilling of micro-vias in PCB substrates. In: **Proceedings of 3rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000) (Cat. No.00EX456)**. [S.l.]: IEEE, 2000. p. 321 – 326. ISBN 0-7803-6644-1.
- GASPAR, J. M. B. **Estudo da cura e do comportamento reológico de sistemas poliméricos altamente reforçados em estereolitografia**. 2006. 150 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Polímeros) — Universidade do Minho.
- GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. **Nature Materials**, Nature Publishing Group, v. 6, p. 183 – 191, Mar 2007.
- GERBER SYSTEMS CORP. Heinz Joseph Gerber e David J Logan. **X-Y Plotter**. US3473009A, 1969. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6c/1b/d2/15d663b54808c2/US3473009.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2019.
- GILLES, K.; MURRAY, J. **The Definitive History of the Printed Circuit**. 1999. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.2575&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 23 de março 2019.
- GOULD, R. G. The LASER, light amplification by stimulated emission of radiation. In: FRANKEN, P.; SANDS, R. (Ed.). **The Ann Arbor conference on optical pumping, the University of Michigan**. [S.l.: s.n.], 1959. v. 15.
- HODGE, P. G.; SHERRINGTON, D. C. **Polymer-supported reactions in organic synthesis**. [S.l.]: J. Wiley, 1980. ISBN 0471277126.

HUGGINS, M. L. Principles of polymer chemistry. **Journal of the American Chemical Society**, ACS Publications, v. 76, n. 10, p. 2854 – 2854, 1954.

ITOH, K.; IWASAKI, M.; MATSUI, N. Robust fast and precise positioning of ball screw-driven table system on machine stand. In: **The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2004. AMC '04**. Kawasaki, Japan: IEEE, 2004. p. 511 – 515.

GERBER SYSTEMS CORP. Gerber Heinz Joseph e Ronald B Webster. **Device for exposing discrete portions of a photosensitive surface to a variable intensity light beam**. US3330182A, 1967. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7d/56/4d/e2fdcff300a0b8/US3330182.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2019.

KUO, H.; HUANG, Y. Resolution enhancement using pulse width modulation in digital micromirror device-based point-array scanning pattern exposure. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 79, p. 55 – 60, 2016.

LACERDA, H. B.; BALDUINO FILHO, J.; SIQUEIRA, I. L. Mesa XY para Corte e Solda de Chapas Metálicas Controlada pela Porta USB. In: **3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação-COBEF**. Joinville: [s.n.], 2005.

MACHADO, A. **Comando numérico aplicado às máquinas-ferramenta**. 4. ed. São Paulo: São Paulo: Cone Editora, 1990. 461 p. ISBN 8527401096.

MEIER, D. J.; SCHMIDT, S. H. PCB laser technology for rigid and flex HDI: via formation, structuring, and routing. **CIRCUITREE-CAMPBELL**, BUSINESS NEWS PUBLISHING, Troy Michigan, v. 15, p. 22 – 22, 2002.

MICROMO. **How to prevent step losses with Stepper Motors**. 2017a. Online. Disponível em: https://www.micromo.com/media/wysiwyg/Technical-library/Stepper/Stepper_Why%20Steppers%20Loose%20Steps_WP.pdf. Acesso em: 23 abr. 2019.

MICROMO. **Microstepping Myths and Realities**. 2017b. Online. Disponível em: https://www.micromo.com/media/wysiwyg/Technical-library/Stepper/6_Microstepping%20WP.pdf. Acesso em: 23 abr. 2019.

MOYER, I. E. **CoreXY**. 2012. Disponível em: <http://corexy.com>. Acesso em: 23 mar. 2019.

NOWAK, M. R. *et al.* Laser prototyping of printed circuit boards. **Opto-Electronics Review**, Springer, v. 21, n. 3, p. 320 – 325, 2013.

PAOLI, M. A. D. **Degradação e estabilização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2009. 286 p. ISBN 9788588098442.

PAPPAS, S. P. **UV curing: science and technology**. [S.l.]: Technology Marketing Corporation, Pub. Division, 1978. v. 2. ISBN 0936840080.

PEREIRA, A. G. **Desenvolvimento e avaliação de um editor para programação CN em centros de Usinagem**. 2003. 122 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Paraná - UFPR.

- RANBY, B. G.; RABEK, J. F. **Photodegradation, photo-oxidation, and photostabilization of polymers**. [S.l.]: New York, Wiley, 1975. ISBN 0471707880.
- RODRIGUES, M. R.; NEUMANN, M. G. Fotopolimerização: Princípios e Métodos. **Polímeros**, v. 13, n. 4, p. 276 – 286, 2003. ISSN 0104-1428.
- SCHROEDER, C. **Printed circuit board design using AutoCAD**. Oxford: Newnes, 1998. 336 p. ISBN 978-0-7506-9834-4.
- SILVA, J. J. A. da. **Microscopia De Força Elétrica Em Amostra De Óxido De Grafeno**. 2013. 101 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Física) — Universidade Federal do Ceará - UFC.
- SOARES, R. da S. **Produção de PCB recorrendo a tecnologia Laser**. 2011. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) — Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- SOLLMANN, K. S.; JOUANEH, M. K.; LAVENDER, D. Dynamic modeling of a two-axis, parallel, H-frame-type XY positioning system. **IEEE/ASME transactions on mechatronics**, IEEE, v. 15, n. 2, p. 280 – 290, Abril 2010.
- SOUZA, A. F. de; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: Princípios e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2009. 358 p. ISBN 8588098903.
- SOUZA, G. C. B. de; VOLPATO, N. **Síntese e caracterização preliminar de material fotossensível para manufatura aditiva**. 2015. 115 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- STARKEY, P. ICT Evening Seminar - laser direct imaging. **Circuit World**, Emerald, v. 30, n. 2, Jun 2004. ISSN 0305-6120.
- TIMPE, H. J.; RAJENDRAN, A. G. Light-induced polymer and polymerization reactions-42. A kinetic study of cationic photopolymerization with (benzoin derivative)/(onium salt) systems. **European polymer journal**, Elsevier, v. 27, n. 1, p. 77 – 83, 1991.

APÊNDICE A – Capabilidade de empresas brasileiras

Tabela 6 – Capabilidade de PCI empresas brasileiras.

Empresa	Capabilidade	
	Pista metalizada externa	
	Largura mm	Espaçamento mm
www.micropress.com.br	0,100	0,100
	0,152	0,152
	0,200	0,200
www.circuibras.com.br	0,100	0,100
	0,125	0,125
	0,175	0,175
	0,225	0,225
www.rcicircuitos.com.br	0,152	0,152
www.wf.ind.br	0,254	0,254
www.pciparana.com.br	0,100	0,100
	0,152	0,152
	0,200	0,200
www.lauquen.com.br	0,050	0,050
	0,075	0,075
www.alfapress.com	0,152	0,152
www.montecnica.ind.br	0,200	0,200

Fonte: Disponível no sítio web das empresas.

APÊNDICE B – Configurações do Grbl

Tabela com as configurações do Grbl utilizadas no protótipo.

Tabela 7 – Configurações.

Valor	Descrição
\$0=10	Tamanho do pulso (microsegundos)
\$1=25	Atraso de inatividade do motor (milissegundos)
\$2=0	Inverter os pinos de pulso de passo XYZ (máscara)
\$3=3	Inverter os pinos de direção XYZ (máscara)
\$4=0	Inverter o habilitar do motor (booleano)
\$5=0	Inverter os pinos de limites XYZ (booleano)
\$6=0	Inverter o pino do <i>Probe</i> (booleano)
\$10=1	Relatório de <i>status</i> (máscara)
\$11=0.01	Desvio de junção (milímetros)
\$12=0.002	Tolerância ao arco (milímetros)
\$13=0	Relatório em polegadas (booleano)
\$20=1	Limites através de <i>firmware</i> (booleano)
\$21=1	Limites através de <i>hardware</i> (booleano)
\$22=1	Ciclo de <i>Homing</i> (booleano)
\$23=3	Inverter a direção de <i>Homing</i> (máscara)
\$24=1200	Velocidade de avanço do <i>Homing</i> (milímetros por minuto)
\$25=9000	Velocidade de busca do <i>Homing</i> (milímetros por minuto)

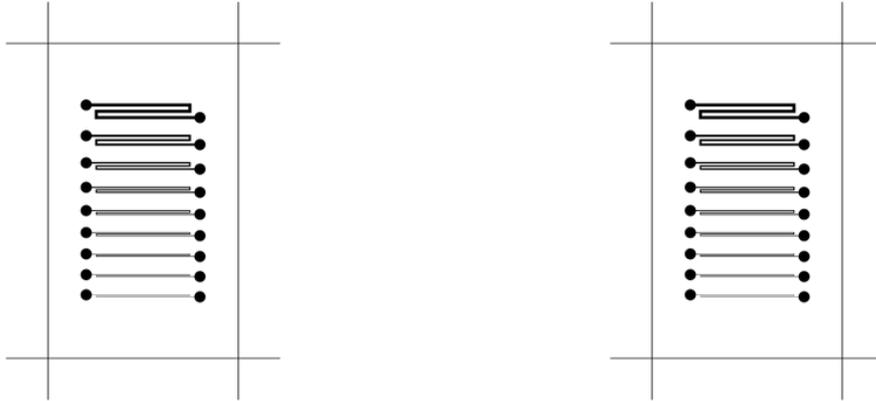
Valor	Descrição
\$26=250	<i>Homing debounce</i> (milessegundos)
\$27=5	Recuo do Homing (milímetros)
\$30=255	Velocidade máxima do fuso (rotação por minuto)
\$31=0	Velocidade mínima do fuso (rotação por minuto)
\$32=1	Modo <i>Laser</i> (booleano)
\$100=80	Passos por milímetro de X (unidades)
\$101=80	Passos por milímetro de Y (unidades)
\$102=80	Passos por milímetro de Z (unidades)
\$110=20000	Velocidade máxima de X (milímetros por minuto)
\$111=20000	Velocidade máxima de Y (milímetros por minuto)
\$112=20000	Velocidade máxima de Z (milímetros por minuto)
\$120=600	Aceleração de X (milímetros por segundo ao quadrado)
\$121=600	Aceleração de Y (milímetros por segundo ao quadrado)
\$122=600	Aceleração de Z (milímetros por segundo ao quadrado)
\$130=250	Tamanho da área útil de X (milímetros)
\$131=230	Tamanho da área útil de Y (milímetros)
\$132=200	Tamanho da área útil de Z (milímetros)

Fonte: Elaborada pelo autor.

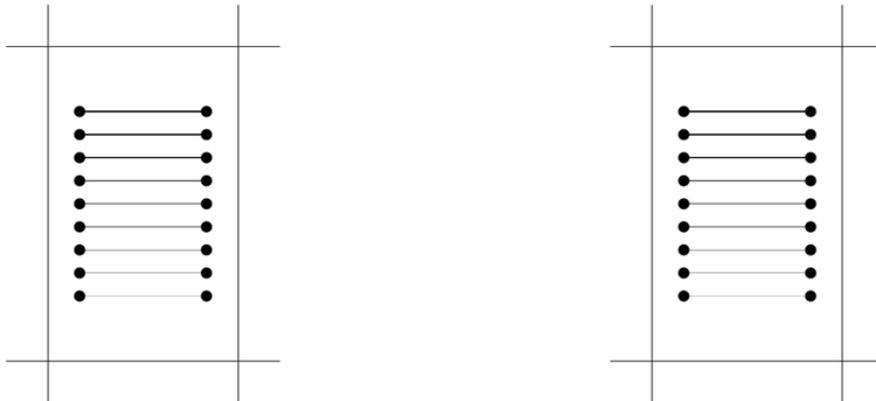
APÊNDICE C – Cupons individuais de ensaio

Figura 73 – Cupons de ensaio.

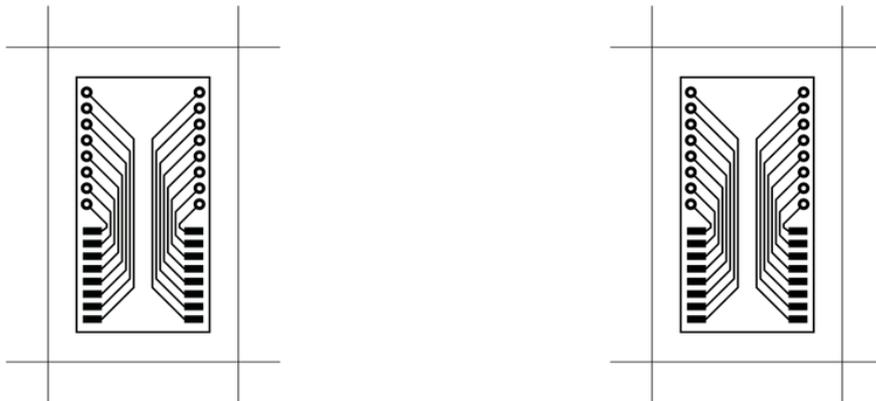
CUPOM DE ENSAIO A



CUPOM DE ENSAIO B



CUPOM DE ENSAIO C



Fonte: Elaborada pelo autor.

ANEXO A – Códigos G padrão ISO 1056:1975

Tabela 8 – Códigos G (*General or preparatory*) pelo padrão ISO 1056:1975

Código G	Função
G00	Posicionamento rápido
G01	Interpolação linear
G02	Interpolação circular no sentido horário (CW)
G03	Interpolação circular no sentido anti-horário (CCW)
G04	Temporização (Dwell)
G05	Não registrado
G06	Interpolação parabólica
G07	Não registrado
G08	Aceleração
G09	Desaceleração
G10 a G16	Não registrado
G17	Seleção do plano XY
G18	Seleção do plano ZX
G19	Seleção do plano YZ
G20	Programação em sistema Inglês (Polegadas)
G21	Programação em sistema Internacional (Métrico)
G22 a G24	Não registrado
G25 a G27	Permanentemente não registrado

Código G	Função
G28	Retorna a posição do Zero máquina
G29 a G32	Não registrados
G33	Corte em linha, com avanço constante
G34	Corte em linha, com avanço acelerando
G35	Corte em linha, com avanço desacelerando
G36 a G39	Permanentemente não registrado
G40	Cancelamento da compensação do diâmetro da ferramenta
G41	Compensação do diâmetro da ferramenta (Esquerda)
G42	Compensação do diâmetro da ferramenta (Direita)
G43	Compensação do comprimento da ferramenta (Positivo)
G44	Compensação do comprimento da ferramenta (Negativo)
G45 a G52	Compensações de comprimentos das ferramentas
G53	Cancelamento das configurações de posicionamento fora do zero fixo
G54	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (01)
G55	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (02)
G56	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (03)
G57	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (04)
G58	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (05)
G59	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (06)
G60	Posicionamento exato (Fino)
G61	Posicionamento exato (Médio)
G62	Posicionamento (Grosso)
G63	Habilitar óleo refrigerante por dentro da ferramenta

Código G	Função
G64 a G67	Não registrados
G68	Compensação da ferramenta por dentro do raio de canto
G69	Compensação da ferramenta por fora do raio de canto
G70	Programa em Polegadas
G71	Programa em metros
G72 a G79	Não registrados
G80	Cancelamento dos ciclos fixos
G81 a G89	Ciclos fixos
G90	Posicionamento absoluto
G91	Posicionamento incremental
G92	Zeragem de eixos (mandatório sobre os G54. . .)
G93	Avanço dado em tempo inverso (Inverse Time)
G94	Avanço dado em minutos
G95	Avanço por revolução
G96	Avanço constante sobre superfícies
G97	Rotação do fuso dado em RPM
G98 e G99	Não registrados

* Disponível em: <https://www.mundocnc.com.br/basic7.php>. Acesso em: 25 abr. 2019

Nota: Os códigos que estão como não registrados indicam que a norma ISO não definiu nenhuma função para o código. Os fabricantes de máquinas e controles estão livres para estabelecer uma função para estes códigos, isso também inclui os códigos acima de G99.

ANEXO B – Códigos G suportados no Grbl v1.1x

- **G0, G1:** Movimentos lineares.
- **G2, G3:** Arco e movimentos helicoidais.
- **G4:** Temporização (Dwell).
- **G10 L2, G10 L20:** Definir deslocamentos de coordenadas de trabalho.
- **G17, G18, G19:** Seleção de Planos.
- **G20, G21:** Unidades.
- **G28, G30:** Ir para a posição pré-definida.
- **G28.1, G30.1:** Definir posição pré-definida.
- **G38.2:** Sondagem.
- **G38.3, G38.4, G38.5:** Sondagem.
- **G40:** Modos de compensação do raio do corte DESLIGADO (apenas).
- **G43.1, G49:** Compensações de comprimento de ferramenta dinâmica.
- **G53:** Mover em coordenadas absolutas.
- **G54, G55, G56, G57, G58, G59:** Sistemas de coordenadas de trabalho.
- **G61:** Modos de controle de caminho.
- **G80:** Cancelar o modo de movimento.
- **G90, G91:** Modos de Distância.
- **G91.1:** Modos de distância do arco IJK.
- **G92:** Deslocamento de coordenadas.
- **G92.1:** Limpar deslocamentos do sistema de coordenadas.
- **G93, G94:** Modos de taxa de avanço.
- **M0, M2, M30:** Pausa do programa e fim.
- **M3, M4, M5:** Controle do fuso.
- **M7 * , M8, M9:** Controle do líquido de arrefecimento.
- **M56 * :** Controle de cancelamento de movimento de estacionamento.

(*) indica comandos não habilitados por padrão no arquivo *config.h*.¹

¹ Disponível em: <https://github.com/gnea/grbl/wiki>. Acesso em: 22 abr. 2019