



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VINÍCIUS GERALDO DE LIMA

**DESIGN DE UMA MÁQUINA DE CORTE A LASER QUE UTILIZA DA
TECNOLOGIA CNC COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO**

CARAÚBAS-RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Ld Lima, Vinícius.
 DESIGN DE UMA MÁQUINA DE CORTE A LASER QUE
 UTILIZA DA TECNOLOGIA CNC COM MATERIAIS DE BAIXO
 CUSTO / Vinícius Lima. - 2018.
 57 f. : il.

 Orientador: Wendell Albano.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Mecânica, 2018.

 1. Materials Processing. 2. CNC Technology. 3.
 Laser. 4. Acceptor. I. Albano, Wendell, orient.
 II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

VINÍCIUS GERALDO DE LIMA

**DESIGN DE UMA MÁQUINA DE CORTE A LASER QUE UTILIZA DA
TECNOLOGIA CNC COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Campus Caraúbas para a obtenção do título em
Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Me. Wendell Albano –
UFERSA.

CARAÚBAS – RN

2018

VINÍCIUS GERALDO DE LIMA

**DESIGN DE UMA MÁQUINA DE CORTE A LASER QUE UTILIZA DA
TECNOLOGIA CNC COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Campus Caraúbas para a obtenção do título em
Engenharia Mecânica.

APROVADO EM: 23 / 04 / 2018

BANCA EXAMINADORA

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.

Prof. MSc Wendell Albano
Presidente

Prof.ª Dr.ª Ana Claudia de Melo Caldas Batista
Membro

Prof. Msc Anderson Guimarães Oliveira

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua imperceptível proteção e orientação em cada passo e caminho escolhido por mim a ser traçado.

Aos meus Pais, pelo apoio e motivação durante toda a jornada, sendo exemplo de pessoas a ser seguida, trabalhando sempre com bom coração e fé, nunca desistindo de seus objetivos.

A Daysa Rêgo, minha prima, por me auxiliar sempre que precisei, e protagonista em momento decisório que me possibilitou ser um Engenheiro.

A Wendell Albano, meu professor e orientador, pelo suporte e disponibilidade.

RESUMO

A tecnologia CNC tem facilitado o processamento de materiais, principalmente na usinagem, possibilitando produção de produtos com maior qualidade de acabamento, precisão e alta produção. Neste meio, há a tecnologia laser, que aliada a tecnologia CNC vem revolucionando o processamento de materiais, principalmente no corte. O presente trabalho trata do projeto de uma máquina de corte a laser de baixo custo que utiliza da tecnologia de comando numérico computacional, para auxiliar a equipe Acceptor Aerodesign no corte de madeira balsa utilizada para desenvolvimento de seus protótipos. Para isso, foi realizado Benchmarking, objetivando produzir uma máquina tão eficiente quanto as presentes no mercado; foi feito o estudo do conceito de usinagem a laser; dimensionamento de motores de passo; cálculo da potência do laser necessária para cortar madeira balsa de 1,5mm a uma velocidade predeterminada, equilibrando estes dois parâmetros interdependentes para um melhor custo benefício; e design da máquina, onde foi feito modelagem utilizando o *software Autodesk Inventor PRO 2018*. Por fim, elaborou-se plantas com quantidade de peças, materiais e dimensões, resultando em um projeto compacto, fácil de montar e de baixo custo.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira balsa. Tecnologia CNC. Corte a laser. Acceptor. Benchmarking.

ABSTRACT

The CNC technology has improved the material processing, mostly for machining, enabling products development with greater quality, greater precision and higher production. The technology laser along with CNC is revolutionizing this study field. The present work consists in the development of a low-cost laser cutting machine that works with computer numerical command technology, to assist the “acceptor aerodesign” team on cutting balsa wood used on their prototypes development. For this purpose, it was used a benchmarking aiming to design a machine as efficient as the existing on the market; it was studied the laser machining process; stepper motor sizing; laser power required to cut 1.5mm balsa wood using a predefined velocity, balancing this two interdependent parameters for a better cost benefit equilibrium; machine design with a 3D cad modeling using *Autodesk Inventor PRO 2018 software*. Finally, blueprints with parts number, materials and dimensions, resulting a compact, easy assembling and low cost project.

KEY WORDS: Materials Processing. CNC Technology. Laser. Acceptor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Velocidade corte para laser de fibra e semiconductor.	16
Figura 2 – Estrutura de um laser semiconductor.	17
Figura 3 – Barra de laser semiconductor.	17
Figura 4 – Corte de metal a laser.	18
Figura 5 – Comportamento da radiação na peça de trabalho.	18
Figura 6 – Ajuste de foco recomendado.	19
Figura 7 – Espessura do Kerf para diferentes tipos de corte.	19
Figura 8 – Relutância variável de duas fases.	21
Figura 9 – Motor de passo com ímã permanente.	21
Figura 10 – Motor de passo híbrido.	22
Figura 11 – Etapas de desenvolvimento de projeto.	23
Figura 12 – Máquina de corte a laser GWEIKE.	24
Figura 13 – Esquema geral de funcionamento da máquina.	25
Figura 14 – Estimativa de perímetro de perfil aerodinâmico.	27
Figura 15 – Tempo e potência do laser para diferentes velocidades de corte.	27
Figura 16 – Módulo com laser pulsado - 15W e 450nm.	28
Figura 17 – Modelagem do cabeçote móvel.	29
Figura 18 – Placa controladora Shield V3 (a) e driver DRV8825 (b).	32
Figura 19 – Vista superior com partes principais.	33
Figura 20 – Polia (a), correia (b) e polia com rolamento interno (c).	34
Figura 21 – Informações de tensão da fonte de alimentação ATX	34
Figura 22 – Diagrama elétrico.	35
Figura 23 – Pinagem DRV8825.	35
Figura 24 – Conexão de jumper.	36
Figura 25 – Posicionamento DRV8825 na Shield V3.	36
Figura 26 – Montagem cantoneira extremidade esquerda.	37
Figura 27 – Montagem cantoneira extremidade direita.	37
Figura 28 - Conexão fuso e cantoneira esquerda.	38
Figura 29 – Montagem parafuso.	38
Figura 30 – Detalhes de conexões do cabeçote móvel.	39
Figura 31 – Detalhes de conexões de cabeçote móvel.	39
Figura 32 – Vista explodida de canto da extremidade esquerda.	40

Figura 33 – Fixação polia.	40
Figura 34 – Interface software LaserGRBL.	41
Figura 35 – Etapas de funcionamento do software.....	41
Figura 36 – Modelagem da máquina.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comprimento de onda de diferentes tipos de laser.....	14
Tabela 2 – Comparação de eficiência de diferentes tipos de corte.....	15
Tabela 4 – Características do laser.	28
Tabela 5 – Preço de diferentes modelos de motores de passo.....	30
Tabela 6 – Informações sobre o motor de passo 17HS3401.	30
Tabela 7 – Modelos de placas, driver e softwares compatíveis.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

NC	Comando Numérico
CNC	Comando numérico computacional
GRBL	Greater Rockford Baseball League
CAD	Desenho assistido por computador
CAM	Manufatura assistida por computador
b	Diâmetro da polia
F	Força
T	Torque
m	massa
a	aceleração
CMP	Configuração de micro passos
PC	Passo da correia
V_i	Tensão elétrica do fio/componente
I	Corrente elétrica
P_c	Potência total requerida para corte
P_{Tp}	Energia para aquecer a porção de cavaco à sua temperatura de processo
P_m	Potência para fundir o volume de cavaco
P_v	Potência para evaporar o volume de cavaco
P_l	Potência para compensar as perdas de calor por condução
v_c	Velocidade de corte
P_c	Perímetro de corte
t_c	Tempo de corte
l_c	Comprimento de corte

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	TECNOLOGIA LASER	13
2.1.1	Laser a gás	15
2.1.2	Laser sólido	15
2.1.3	Laser líquido	16
2.1.4	Semicondutores ou Diodo Laser.....	16
2.2	PARÂMETROS DE CORTE NO CORTE A LASER.....	18
2.3	TECNOLOGIA CNC	20
2.4	MOTOR DE PASSO	20
2.5	PLACA CONTROLADORA E DRIVER.....	22
3	METODOLOGIA	23
3.1	DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DO LASER.....	25
3.2	DIMENSIONAMENTO E ESCOLHA DE MOTOR DE PASSO	28
3.3	SELEÇÃO DE PLACA CONTROLADORA E DRIVER.....	31
3.4	SELEÇÃO DE MATERIAL, PEÇAS CONSTRUTIVAS E CONEXÕES.....	32
3.5	ESCOLHA DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....	34
3.6	DETALHES PARA MONTAGEM DA PLACA CONTROLADORA E DRIVERS 35	
3.7	DETALHES PARA MONTAGEM ESTRUTURAL.....	36
3.8	ESCOLHA DO SOFTWARE.....	40
4	RESULTADOS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	42
5	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNCIDE I – DIAGRAMA DE CONEXÕES DOS COMPONENTES	46
	APÊNDICE II – MEMORIAL DE CÁCULOS.....	47
	APÊNDICE III – CONSIGURAÇÃO DE SOFTWARES.....	48
	ANEXO I – PLANTAS TÉCNICAS.....	52
	ANEXO II – VISTAS E LISTA DE PEÇAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Tem sido crescente a exigência de corte com maior qualidade de acabamento e precisão na fabricação de aviões para competições aero design. Esta necessidade se deve a formas complexas dos perfis aerodinâmicos utilizados que buscam ganhos de eficiência com redução de peso e melhor escoamento do ar nas superfícies sustentadoras durante voo com superfícies perfeitamente alinhadas. Tais cortes eram feitos à mão, com estilete e lixa, exigindo grande mão de obra e tempo de trabalho. Atualmente, esses cortes são feitos em máquina de corte a laser CNC que garantem aumento de produção, maior qualidade de acabamento, maior precisão de montagem e aumento da eficiência de aeronaves. Além do corte de perfis aerodinâmicos, no campo de sistemas automatizados da indústria e mercado, a tecnologia de corte a laser vem sendo cada vez mais difundida, com ampla aplicação nos mais diversificados campos, como: Soldagem, tratamento térmico, usinagem – marcação e corte de materiais diversos, fabricação de aparelhos para uso medicinal e odontológico e produção de brindes para revenda.

Dentro deste contexto, este trabalho foca no *design* de uma máquina a laser que utiliza do comando numérico computacional. Para isto, foi feito uma pesquisa dos tipos de máquinas de corte a laser disponíveis no mercado, junto a levantamento bibliográfico sobre tecnologia laser e tecnologia CNC. Além disto, foi feito pesquisa de peças mecânicas e mecanismos comumente utilizados, bem como análise de peças e componentes que pudessem ser reutilizados, para o desenvolvimento de um projeto que tenha baixo custo, fácil montagem e atenda exigências de cortar madeira balsa com precisão.

Segundo Singh (2012), o laser é um dispositivo poderoso que produz radiação eletromagnética concentrada, sendo capaz de fundir e vaporizar o material em volta desse ponto, cortando e furando diversos materiais de acordo com potência e concentração específica dos raios de luz. A eficiência do laser no corte depende de suas características (tipo, ponto focal, comprimento de onda), e características do material (refletividade, condutividade térmica, propriedades). O fato de haver riscos à saúde causados pela alta concentração de energia e liberação de gases no corte, estas máquinas geralmente não são operadas manualmente, sendo utilizado a tecnologia CNC.

1.1 OBJETIVO

Diante do que foi exposto pretende-se projetar uma máquina de corte a laser CNC de baixo custo, com materiais de fácil aquisição no mercado local e que realize o corte de madeira balsa, objetivando auxiliar a equipe Acceptor que utiliza largamente este tipo de madeira no desenvolvimento e realização de seus projetos. Para isso, foi feito levantamento bibliográfico sobre os principais componentes da máquina e pesquisa de peças e softwares que apresentem baixo custo ou que possam ser reutilizadas, para obter um projeto barato, eficiente e de fácil montagem.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para fundamentação, teórica foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre os componentes principais da máquina, que consistem em: Motor de passo, para movimentação dos carros; módulo laser - ferramenta de corte; software, responsável por controlar o hardware; placa controladora e driver, para comunicação entre computador e motores, controlando-os; fonte de alimentação, para fornecer energia ao sistema.

2.1 TECNOLOGIA LASER

A palavra laser surgiu da abreviatura para a expressão *light amplification by stimulated emission of radiation* (em português: amplificação de luz por emissão estimulada), batizada pelo norte americano Gordon Gold (RESENDE, 2016).

Segundo Resende (2016), o desenvolvimento teórico do laser foi realizado ainda por Einstein em 1916, com a publicação do seu tratado *Zur Quantum Theorie der Strahlung*, baseado na teoria quântica proposta por Planck em 1900. No entanto, foi apenas em 1960 que Maiman conseguiu pela primeira vez a emissão estimulada de radiação, desenvolvendo o primeiro laser, chamado por ele de maser. Porém, foi Gold quem fez a primeira aplicação com sucesso da emissão estimulada de micro-ondas, obtendo um feixe de luz altamente concentrado, que desde então, vem revolucionando os mais diversos campos da ciência com aplicações que vão desde microcirurgias até explorações espaciais.

Laser é uma forma de radiação não ionizante concentrada que em contato com diferentes materiais provoca aquecimento, fundição e evaporação do material, furando-o ou cortando quando há deslocamento do feixe de luz, possibilitando o uso em soldagem, furação e corte de materiais. Isso ocorre pelo fato de no laser conter lentes que forçam as emissões de luz provenientes da agitação dos átomos na região ativa (que gera o feixe de luz) alimentado por uma fonte de energia externa, em uma única direção, definindo o comprimento de onda e comprimento focal, característica esta que atribui a cada tipo de laser sua particularidade de aplicação.

Segundo Dahotre (2008) o poder condutivo e potencial absoritivo do material depende diretamente do comprimento de onda do laser usado. No processo de corte de materiais, os maiores comprimentos de onda são utilizados para cortar materiais de alta reflexão e cores claras, que são mal absorvedores de calor e maiores refletores de luz; ao passo que lasers com curtos comprimentos de onda são melhores para uso em materiais de cor mais escura, que

refletem menos a luz e absorvem mais calor. A Tabela 1 lista comprimentos de onda típicos dos principais tipos de lasers.

Tabela 1 – Comprimento de onda de diferentes tipos de laser.	
Tipo de Laser	Comprimento de Onda (nm)
Laser de estado sólido	
<i>Nd:YAG</i>	1.064
<i>Ruby</i>	694
<i>Nd:glass</i>	1.062
<i>Alexandrite</i>	700-820
<i>Ti-sapphire</i>	700-1.100
<i>Er:YAG</i>	2.940
<i>Nd:YLF</i>	1.047
Lazeres a Gás	
<i>HeNe</i>	632,8
<i>Argon</i>	488/514,5
<i>Krypton</i>	520-676
<i>HeCd</i>	441,5/325
<i>CO₂</i>	10.600
<i>ArF</i>	191
<i>KrF</i>	249
<i>XeCl</i>	308
<i>XeF</i>	351
<i>Vapor de Cobre</i>	510,6/578,2
<i>Vapor de Ouro</i>	628
Semicondutor Lasers	
<i>InGaAs</i>	980
<i>AlGaInP</i>	630-680
<i>InGaAsP</i>	1.150-1.650
<i>AlGaAs</i>	780-880
Lazeres Líquidos	
<i>Rhodamine 6G</i>	570-640
<i>Coumarin 102</i>	460-515
<i>Stilbene</i>	403-428

Fonte: Laser Fabrication and Machining of Materials (DAHOTRE, 2008, p. 23).

Apesar do alto custo de aquisição inicial, a tecnologia laser apresenta várias vantagens perante outros processos existentes há mais tempo. Segundo Chryssolouris (1991), para a maioria dos materiais com até 10mm de espessura, o laser oferece uma taxa de remoção de material significativamente mais alta que os demais processos mecânicos. A Tabela 2 abaixo apresenta algumas características dos diferentes tipos de tecnologias de corte e usinagem atualmente utilizadas no mercado (WETTER, 2000).

Tabela 2 – Comparação de eficiência de diferentes tipos de corte.

	<i>Custo do Sistema</i>	<i>Custos operacionais</i>	<i>Volume de produção</i>	<i>Velocidade de produção</i>	<i>Flexibilidade de materiais</i>	<i>Desgaste de ferramenta</i>	<i>Integração do sistema</i>	<i>Espessura do material (mm)</i>	<i>Qualidade do corte</i>	<i>Dificuldade de formas</i>	<i>Nível de ruído</i>
<i>Laser Puncionadora</i>	Alto	Médio	Alto	Alta	Alta	Não	Boa	25	Boa	Boa	Baixo
<i>EDM</i>	Alto	Médio	Alto	Alta	Baixa	Sim	Boa	12	Média	Média	Alto
<i>Fresamento</i>	Médio	Alto	Médio	Lenta	Baixa	Sim	Difícil	100	Boa	Média	Médio
<i>Jato d'água Oxide</i>	Médio	Médio	Médio	Lenta	Alta	Sim	Boa	-	Boa	Média	Médio
<i>Corte Plasma</i>	Alto	Alto	Médio	Lenta	Alta	Sim	Boa	25-150	Boa	Boa	Alto
	Baixo	Baixo	Médio	Lenta	Baixa	Não	Boa	1300	Ruim	Razoável	Alto
	Médio	Alto	Médio	Alta	Baixa	Não	Boa	50	Ruim	Boa	Alto

Fonte: ICS Lectures on Industrial Application of Lasers (WETTER, 2000, p. 35).

Segundo Dahotre (2008), lasers variam de diversas formas, potência e modo de funcionamento, e cada tipo possui uma aplicação recomendada. De um ponto de vista amplo, há lasers sólidos, líquidos, semicondutor e gás, que diferem entre si pelo material que compõe a região ativa, responsável por gerar luz.

2.1.1 Laser a gás

Laser a gás são usados nos mais variados tipos de máquinas, ideal para o corte de madeira, acrílico, vidro e plásticos. Dentre os lasers de gás, o mais famoso e mais difundido é o Laser de CO₂, amplamente usado por apresentar elevada potência, boa qualidade do feixe de luz e acabamento da peça final (CHRYSSOLOURIS, 1991).

Segundo Dahotre (2008), no corte de alguns materiais é necessário a utilização do gás de assistência, geralmente oxigênio, nitrogênio e ar comprimido, para remover gases e partículas de material originadas do corte e elevar a qualidade final da peça e velocidade de corte. O mais utilizado é o oxigênio, pois induz reação exotérmica aumentando a temperatura do processo.

2.1.2 Laser sólido

Nesta classe estão os lasers de fibra e lasers de cristais. Segundo Singh (2012) lasers sólidos são construídos dopando materiais de transição (Ti⁺³, Cr⁺³, V⁺², Co⁺², Ni⁺², Fe⁺²), com íons raros (Ce⁺³, Pr⁺³, Nd⁺³, Pm⁺³, Sm⁺², Eu^{+2,+3}, Tb⁺³, Dy⁺³, Ho⁺³, Er⁺³, Yb⁺³, etc.) e actínídeos como U⁺³, hospedando-os em redes isolantes. A partir disto, são feitas combinações que, ao serem finalizadas, atribuirão ao laser características particulares. O exemplo de uma

combinação é o Nd:YAG (neodímio dopado com granada de ítrio e alumínio), laser de cristal e um dos melhores e mais difundido desta classe, atualmente utilizado em processos de usinagem para marcação e corte de aços, latão, plásticos, e materiais cerâmicos. No entanto, não permitem o corte eficiente de madeira ou acrílico, e possui limitações quanto a velocidade de corte e espessura de corte comparado com laser CO₂. Uma vantagem do laser sólido em relação ao de gás é a não necessidade de refrigeração intensa do sistema e controle do gás de refrigeração, diminuindo custos de operação e manutenção.

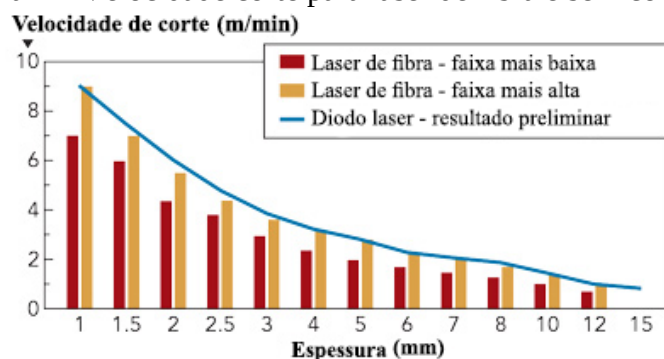
2.1.3 Laser líquido

Pouco difundido, o laser de líquido é constituído de corantes orgânicos dissolvidos em solventes. Nesse grupo, o meio gerador de luz é líquido, geralmente um corante orgânico. Uma das principais particularidades deste tipo de laser é sua variedade de comprimentos de onda, variando de 0,2 a 1,0 μ m, resultantes das excelentes propriedades de absorção e emissão de radiação das moléculas do corante orgânico (SINGH, 2012).

2.1.4 Semicondutores ou Diodo Laser

O Laser Semicondutor vem sendo cada vez mais utilizado, com gás de assistência ou não. Sua atratividade decorre principalmente de seu menor custo de produção e melhor eficiência energética (SAUCEDO, 2016). Outras vantagens como: tamanho compacto, aumento de velocidade de corte, maior vida útil, baixo custo de manutenção, facilidade de substituição etc, reduz a complexidade de manuseio do sistema, tornando-o cobiçado. A Figura 1 exemplifica de forma gráfica o aumento da velocidade no corte de aço carbono em função do aumento da espessura do material para dois tipos de laser, de fibra e semicondutor (diodo).

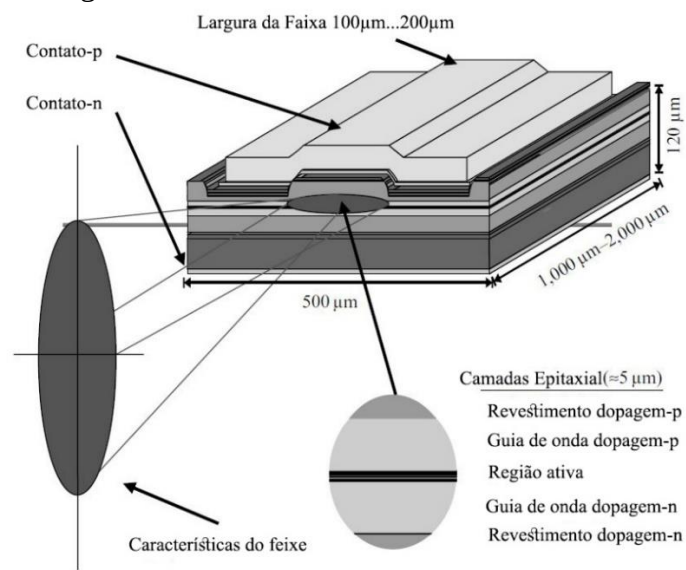
Figura 1 – Velocidade corte para laser de fibra e semicondutor.



Fonte: Adaptado de Saucedo (2016).

De acordo com Liu (2015), o laser semiconductor é constituído de um chip com uma face positiva (P) e uma negativa (n) de materiais condutivos, que quando energizadas induzem a geração de luz na região ativa pela reação entre fótons e elétrons (Figura 2). A região ativa é composta pela combinação de materiais como Al, In, Ga e As, em que sua quantidade influencia diretamente no comprimento de onda final do laser semiconductor.

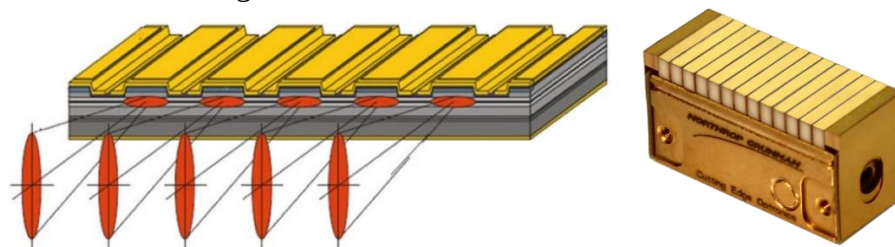
Figura 2 – Estrutura de um laser semiconductor.



Fonte: Adaptado de Bachmann (2007, p. 6).

Para obter alta potência, múltiplos emissores são organizados em sequência, cada unidade com uma potência específica, conhecido por barra semicondutora. A Figura 3 ilustra sua estrutura (LIU, 2015).

Figura 3 – Barra de laser semiconductor.



Fonte: LIU (2015, p. 13).

Para Bachmann (2007), o bom foco exigido para o corte ainda não pode ser atingido em diodos laser de alta potência na ordem de KW. No entanto, é apenas uma questão de tempo até que cientistas e engenheiros resolvam este problema.

2.2 PARÂMETROS DE CORTE NO CORTE A LASER

Na área da usinagem, a maior utilização do laser é no corte de materiais (CHRYSSOLOURIS,1991), e os principais parâmetros a serem ajustados para um bom resultado são a velocidade de corte, potência do laser e ajuste de ponto focal. Para que haja o corte, o feixe de luz descola-se com uma certa velocidade de modo que o feixe permanece no ponto de corte tempo suficiente para fundir e vaporizar o material, transformando-o em fuligem, e indo para o próximo ponto logo após (Figura 4).

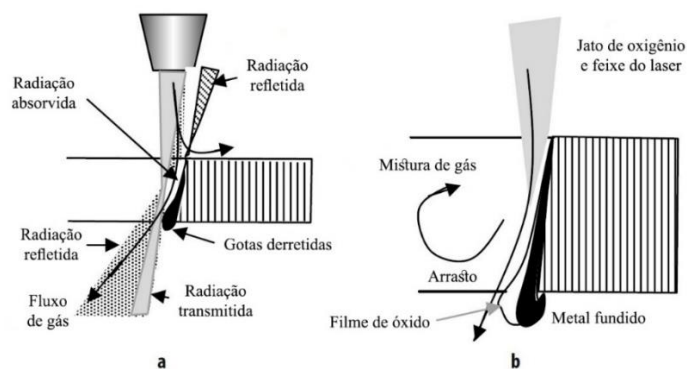
Figura 4 – Corte de metal a laser.



Fonte: Adaptado de Google imagens.

Neste processo, parte da radiação é refletida, parte transmitida e parte absorvida pela peça de trabalho (Figura 5). No corte, furação e soldagem de metais, aço e alumínio, a permanência do feixe por tempo excessivo (baixa velocidade de corte) causará danos no material da vizinhança, pois há fragilização ou até fundição das fronteiras, alterando a qualidade do corte.

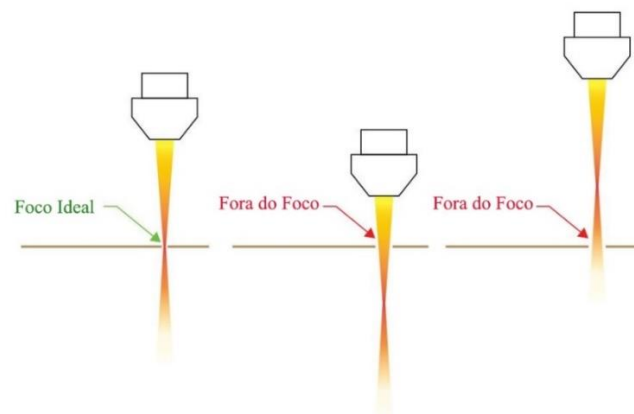
Figura 5 – Comportamento da radiação na peça de trabalho.



Fonte: Adaptado de Steen (2010, p. 161).

O ajuste focal é de extrema importância para qualidade do corte. No laser, o feixe de luz na saída é mais disperso, com diâmetro focal maior, e é gradativamente concentrado de acordo com a lente utilizada até um pequeno diâmetro. A irradiância (potência por unidade de área) máxima é atingida no menor diâmetro focal. Para ajuste na máquina, o que deve ser feito é manter o menor tamanho do foco em contato com a peça (Figura 6), permitindo corte mais rápido e com maior qualidade de acabamento (ARTEAGA, 2010)

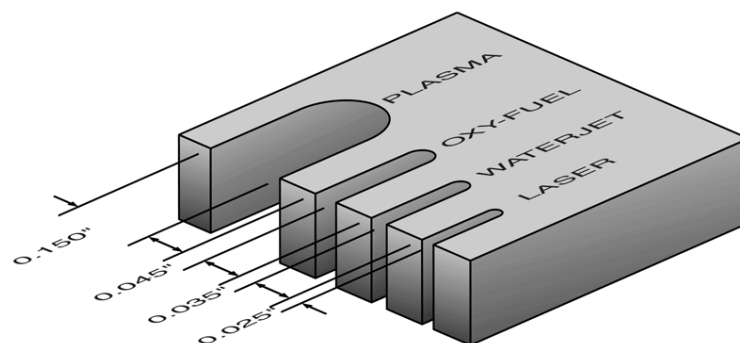
Figura 6 – Ajuste de foco recomendado.



Fonte: Adaptado de Machinemfg.com (2018).

O posicionamento focal influencia diretamente na Kerf e consequentemente a potência do laser, pois um maior diâmetro de contato de luz, mais material será aquecido e removido. A Kerf refere-se a largura do material que é removido, e o corte a laser é o processo que apresenta menor Kerk dentre os existentes no mercado, o que torna o sistema adequado para aplicação em corte de madeira balsa para aeromodelistas e equipes que participam de competições aerodesign (Figura 7).

Figura 7 – Espessura do Kerf para diferentes tipos de corte.



Fonte: ESAB (2018).

2.3 TECNOLOGIA CNC

A tecnologia CNC foi desenvolvida no MIT no início dos anos 50 (1950), e a sigla CNC é uma evolução do termo NC, que em contexto amplo refere-se ao controle de máquinas ferramentas por computador (SUH, 2008). As primeiras máquinas NC rodavam através de cartões perfurados, em que cada fabricante de máquina tinha sua própria linguagem para definição de processos. Esta tecnologia apenas se popularizou em 1958, quando as linguagens foram padronizadas e surgiu o Código G (G-code), ao passo que, durante a década de 60 surgiu os programas CAD (SUH, 2008).

No ano de 2009, Simen Svale Skogsrud liberou gratuitamente a primeira versão do GRBL, um controlador de máquinas cartesianas de três eixos (XYZ) de computador, atualmente utilizado em impressoras 3D, tornos mecânicos, máquinas fresadoras, centrais de usinagem etc de pequeno porte, que utilizam da tecnologia de comando computacional para funcionamento automatizado (SUH, 2008). No entanto, máquinas de grande porte já contam com sistemas mais avançados de comando numérico que trabalha com eixos complementares (ABC), possibilitando manufatura de peças mais complexas.

2.4 MOTOR DE PASSO

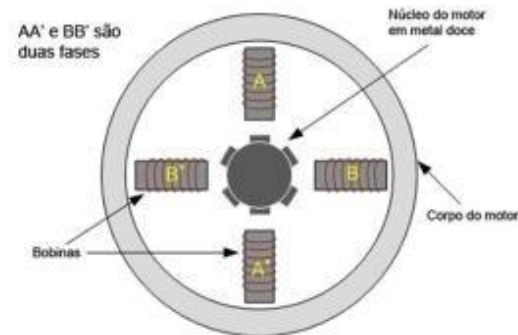
Um motor de passo é um dispositivo eletromecânico que converte pulsos de energia elétrica em movimentos discretos, chamados de passo (RIBEIRO, 2013). Este motor é constituído de bobinas e eixos internos magnetizados ou não, onde o número de passos depende do número de bobinas e formato do eixo, atribuindo maior ou menor precisão, ao passo que a velocidade e rotação do motor é determinado pela frequência com que os pulsos são enviados. Este tipo de motor vem sendo amplamente utilizado em máquina CNC por oferecer alta precisão de deslocamento, e sua diversidade exige bastante cuidado no momento de escolha para que não seja feito investimento errado. Neste contexto, os motores de passo são divididos em três tipos: Relutância variável, imã permanente e híbrido.

- Relutância variável

O motor de relutância variável é constituído de um eixo principal de ferro (dentado) posicionado entre extratores enrolados (bobinas). As bobinas são energizadas com corrente CC e geram um campo magnético que tende a atrair os dentes magnetizados, alinhando-se. Os

dentados do rotor são concebidos de forma que quando estão alinhados a uma fase, eles ficam desalinhados para outra. Geralmente, são usadas de três a cinco bobinas neste tipo de motor (Figura 8). Uma maior quantidade de bobinas resulta em uma maior precisão do motor, ou seja, menores passos (RIBEIRO, 2013).

Figura 8 – Relutância variável de duas fases.

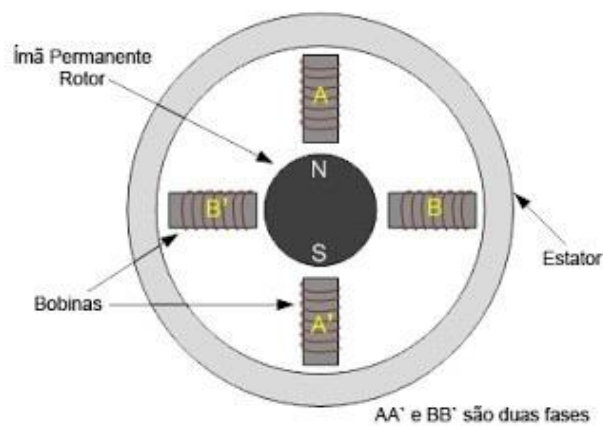


Fonte: Ribeiro (2017).

- Ímã permanente

Segundo Ribeiro (2013), neste tipo de motor o rotor é construído com ímãs permanentes que permitem um maior fluxo magnético entre o eixo central e os extratores (quando energizados), apresentando maior torque que o de relutância variável (Figura 9). Estas características resultam em baixo custo de produção, porém menor precisão, com passos de $7,5^\circ$ a 15° (48 a 24 passos por revolução).

Figura 9 – Motor de passo com ímã permanente.

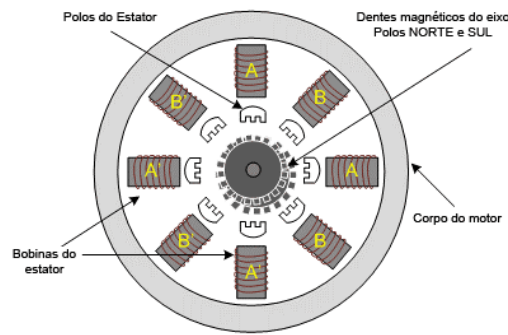


Fonte: Ribeiro (2017).

- Motor Híbrido

Este motor agrega a boa mecânica do motor de relutância variável (rotor dentado) e a potência do ímã permanente no eixo. Seu eixo possui dois grupos de dentes, um com polo sul e outro com polo norte, resultando em um motor de maior torque e precisão, com variação do ângulo de passo de $3,6^\circ$ a $0,9^\circ$ (100 a 400 passos por volta). Isto possibilita um maior controle de torque, velocidade e passo (RIBEIRO, 2013). No entanto, é o mais caro dentre os modelos (Figura 10).

Figura 10 – Motor de passo híbrido.



Fonte: Ribeiro (2017).

2.5 PLACA CONTROLADORA E DRIVER

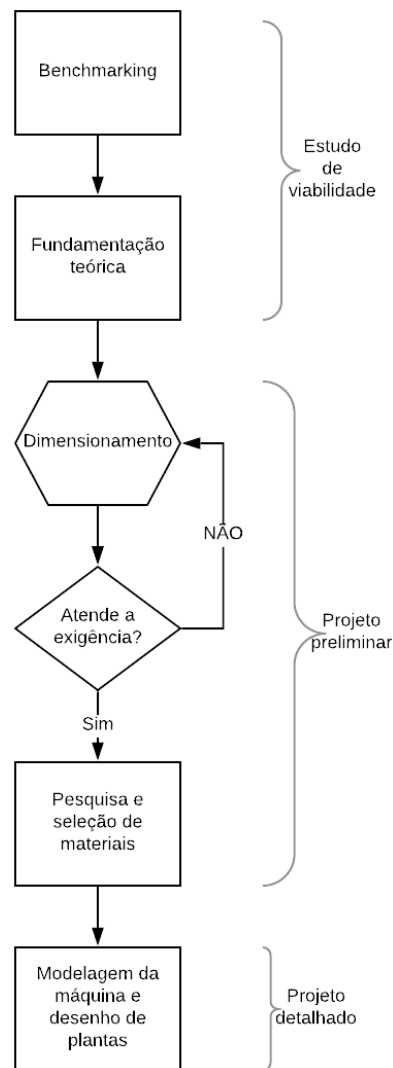
A placa controladora, ou placa principal, é o componente que recebe tensão da fonte de alimentação e sinais vindos do computador, e distribui aos demais dispositivos conectados, como drivers, laser ou retífica, sensores, botões de emergência etc. Cada placa possui uma faixa de tensão de funcionamento, bem como diferentes funcionalidades, e são escolhidas de acordo com o porte e características do projeto.

Driver, é o *hardware* responsável por receber os pulsos da placa controladora e enviá-los ao motor de passo de forma controlada (NEOMOTION, 2017). Assim como a placa controladora, cada driver possui sua faixa de tensão de funcionamento, e são escolhidos de acordo com o motor de passo utilizado, possibilitando controle de velocidade, torque e sincronismo durante o funcionamento.

3 METODOLOGIA

Segundo Delgado Neto (2010), o desenvolvimento de um produto envolve três fases principais de projeto: Estudo de viabilidade, projeto preliminar e projeto detalhado. Seguindo esta ideia, o desenvolvimento do projeto consistiu de cinco passos de forma que essas três etapas foram seguidas, como exemplifica o diagrama na Figura 11.

Figura 11 – Etapas de desenvolvimento de projeto.



Fonte: Autoria própria.

Após identificado a necessidade do design de uma máquina de corte a laser para a equipe acceptor, primeiramente foi realizado uma pesquisa de máquinas existentes no mercado, seguindo a filosofia do Bechmarking. A máquina base para o projeto está lustrado na Figura 12.

Figura 12 – Máquina de corte a laser GWEIKE.



Fonte: gwklaser.com/.

Em seguida, foi feita uma fundamentação teórica das principais peças, softwares e hardwares necessários, com pesquisas bibliográficas e estudo aprofundado sobre cada componente, a fim colher embasamento teórico suficiente para realizar escolhas condizentes ao objetivo inicial.

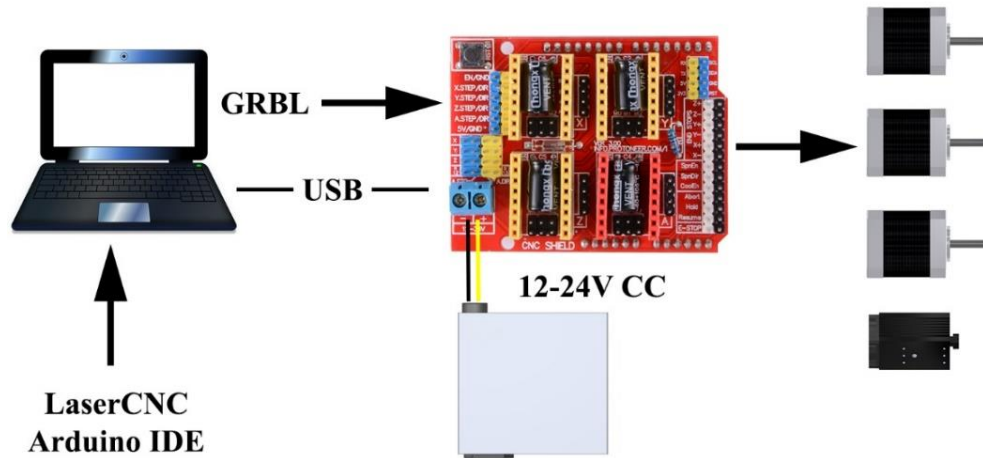
O terceiro passo, foi o dimensionamento de componentes. Para determinar a área de trabalho foi considerado que seria cortado perfis de até 70cm de comprimento. A largura foi suficiente para posicionar até quatro folhas de balsa com sobra lateral.

O quarto passo foi a pesquisa de mercado para seleção de material mais barato e que pudessem ser reutilizadas.

Quinto e último passo foi o projeto detalhado, com modelagem e confecção de plantas técnicas para esclarecer detalhes de montagem, e informar dimensões e formas das peças para confecção.

De modo geral, a máquina de corte a laser funciona da seguinte forma. Sinais são enviados de um computador para a placa controladora e drivers. Os drivers e placa controladora recebem, controlam e distribuem os sinais para os motores de passo e laser, onde os últimos são responsáveis por movimentar os carros e cortar o material. Cada componente deve ser dimensionado para otimizar custo e benefício. A Figura 13 possibilita um melhor entendimento de cada etapa.

Figura 13 – Esquema geral de funcionamento da máquina.



Fonte: Autoria própria.

3.1 DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DO LASER

Segundo Bachmann, Poprawe e Loosen (2007), há diferentes tipos de processo de corte, que são definidos de acordo com a mudança de fase ocorrida na absorção da energia dos raios. Estes podem ser devidos em três principais: Corte com gás inerte, corte por fusão e corte por vaporização. Com o aquecimento da Madeira Balsa, há degradação química, transformando-a instantaneamente em vapor, não havendo fase líquida, o que a enquadra no terceiro processo de corte.

Para dimensionamento de laser é necessário cálculo do balanço da energia, que envolve a energia chega e a energia dissipada e perdida com a interação do material com o ambiente. São exemplos: energia para elevar a temperatura da peça à temperatura de fusão/evaporação; energia para transformação de fase; e energia perdida por condução. Estas contribuições dependem diretamente da espessura do material, velocidade de corte e diâmetro focal, valores correspondes ao volume de material a ser aquecido, transformado e removido.

A potência total requerida (P_C) é calculado pela Equação 1, resultado da soma da energia para aquecer a porção de cavaco à sua temperatura de processo (P_{Tp}), potência para fundir o volume de cavaco (P_m), potência para evaporar o volume de cavaco (P_v) e potência para compensar as perdas de calor por condução (P_l) (BACHMANN, 2007).

$$P_C = P_{Tp} + P_m + P_v + P_l \quad (1)$$

Os termos P_{Tp} , P_m , P_v e P_l são calculados usando as Equações 2 a 5 (BACHMANN, 2007).

$$P_{Tp} = b_m s v_c \rho c [(1 - \delta_v)(T_p - T_0) + \delta_v(T_s - T_0)] \quad (2)$$

$$P_m = b_m s v_c \rho \varepsilon_m \quad (3)$$

$$P_v = \delta_v b_m s v_c \rho \varepsilon_v \quad (4)$$

$$P_l = b_m s v_c \rho c (T_m - T_0) \left[\frac{\sqrt{2\pi}/Pe}{e^{Pe^2}/4} \right] \quad (5)$$

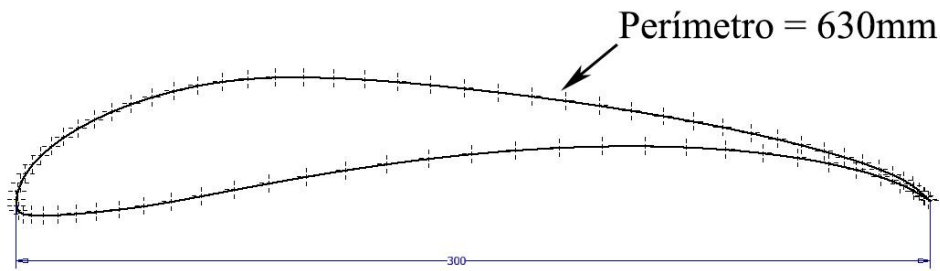
O corte da balsa se dá por vaporização. Com isto, elimina-se da equação a parcela energética necessária para fundir o material (P_m). Como a vaporização da madeira é atingida com maior facilidade comparado com outros materiais, a parcela P_v pode ser tranquilamente desprezada. A madeira balsa possui baixo valor de condução de energia que permite eliminar a parcela de perda por condução P_l . Assim, a estimativa reduz-se apenas ao cálculo da energia necessária para aquecer a porção de material a ser removida à sua temperatura de vaporização.

No site (MakeItFrom.com, 2018), a densidade da balsa é $\rho=130\text{kg/m}^3$. O calor específico é $C_p = 464100\text{J/kgC}$ (TOOLBOX, 2018). A temperatura de carbonização da madeira é $T_p = 600^\circ\text{C}$ (FIGUEROA, 2009), com estimativa de temperatura ambiente de $T_0 = 30^\circ\text{C}$ e a temperatura da superfície da peça de trabalho de $T_s = 29^\circ\text{C}$. A espessura do material usado é $s=0,0015\text{m}$, diâmetro focal $b_m=0,00005\text{m}$ e parcela do kerf vaporizada de $\delta_v = 0\%$ (BACHMANN,2007).

Logo após, utilizando o software Autodesk Inventor, foi checado o perímetro do perfil aerodinâmico S1223 comumente utilizado no aerodesign (Figura 14) para estimar o tempo de corte do perfil (Equação 6).

$$t_c = \frac{l_c}{v_c} \quad (6)$$

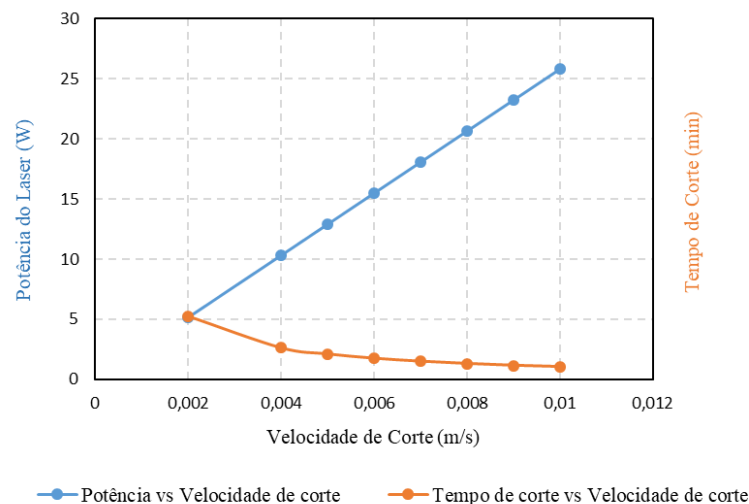
Figura 14 – Estimativa de perímetro de perfil aerodinâmico.



Fonte: Autoria própria.

As Equações 2 e 6 foram inseridas em uma planilha no software Microsoft Excel, e utilizando um método numérico a velocidade de corte (v_c) foi variada de 0 a 0,02m/s, objetivando encontrar um equilíbrio entre tempo de corte e custo de aquisição do laser. Os valores de potência do laser requerida e tempo de corte para diferentes velocidades de corte estão ilustrados graficamente na Figura 15, em que um laser de 15W para velocidade de 0,006 apresentou melhor equilíbrio.

Figura 15 – Tempo e potência do laser para diferentes velocidades de corte.



Fonte: Autoria própria.

Partindo da premissa que o material a ser cortado é madeira, teoricamente o laser que apresentará melhor desempenho na aplicação é o de CO₂. No entanto, fatores como: fragilidade do tubo; necessidade de gás de assistência; sistema de refrigeração à água, aumentando gasto com energia e compra de fonte de alimentação; grande espaço de ocupação; manutenção e cuidado no manuseio do sistema em geral, torna o laser de CO₂ ineficiente para esta máquina.

O laser escolhido foi ZONESUN, 15w e 450nm (Figura 16), por seu custo benefício e versatilidade. De tipo semiconductor, apresenta pequeno comprimento de onda, permitindo não apenas o corte da madeira, mas gravação e corte nos mais diversos tipos de plástico e metal de pequena espessura. As características do laser estão listadas na Tabela 4. Como o projeto é para corte de peças de pequena espessura, há pouco material removido, e não é necessário uso de gás de assistência.

Figura 16 – Módulo com laser pulsado - 15W e 450nm.



Fonte: amazon.com

Tabela 3 – Características do laser.

Propriedade	Valor	Unidade
Poder do laser	15W	Watt
Comprimento de onda	445-450nm	Nano metro
Comprimento focal	~16mm	Milímetro
Tensão de entrada	DC12V	Volts
Corrente de entrada	1,5 a <3A	Ampere
Porta de fonte de alimentação	DC 5,5*2,1	-
Material dissipador de calor	Alumínio aéreo	-
Temperatura de trabalho	-40 a 75 °C	Graus célsius
Tempo de vida	10.000h	Horas

Fonte: Autoria própria.

3.2 DIMENSIONAMENTO E ESCOLHA DE MOTOR DE PASSO

Primeiramente foi determinado o torque necessário para movimentação do conjunto mesa mais peça de trabalho utilizado as Equações 7 e 8 de força e torque listadas abaixo (DIAS, 2015). Pelo fato de o peso em questão ser baixo e o fuso possuir superfícies demasiadamente lisa, o atrito foi desprezado.

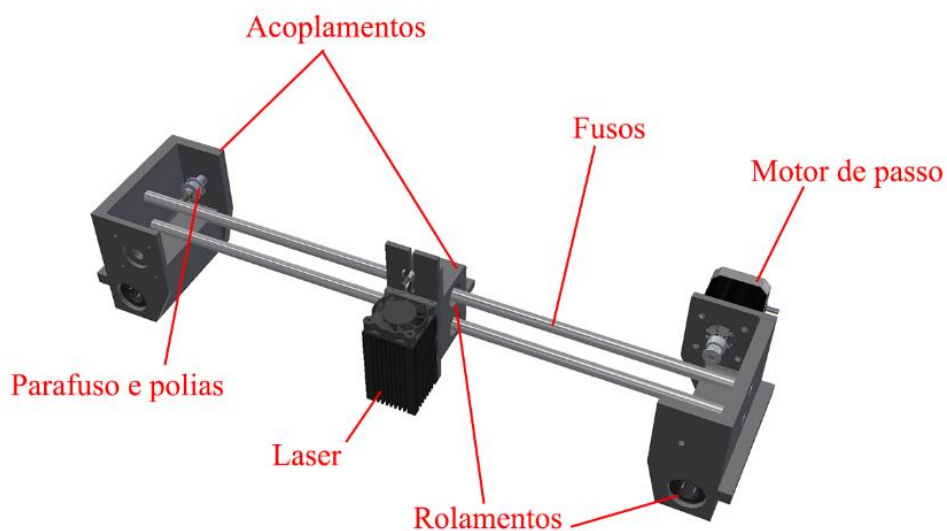
$$F = m * a \quad (7)$$

$$T = F * b \quad (8)$$

- Cálculo de torque requerido para carro longitudinal – cabeçote móvel

Para cálculo do torque para movimentação do cabeçote, foi considerado o peso do laser, motor de passo, fusos e rolamentos, desprezando o atrito entre os rolamento e guia linear. A estimativa de peso foi feita a partir de dados de catálogos de fornecedores e modelagem realizada no software Autodesk Inventor (Figura 17).

Figura 17 – Modelagem do cabeçote móvel.



Fonte: Autoria própria.

O peso estimado foi de 1.250g. Inserindo a massa (m), aceleração gravitacional (a) e diâmetro da polia (b) nas Equações 7 e 8 tem-se:

$$F = m * a = 1,25 * 9,81 = 12,2625N$$

$$T = F * b = 12,2625 * 0,0075 = 0,0919Nm$$

Conclui-se que é necessário um motor que ofereça torque de no mínimo 0,0919Nm. Por motivos de precisão de deslocamento, optou-se por usar dois motores para movimentação do cabeçote móvel, uma em cada lado da máquina, eliminando a tendência de rotação.

- Cálculo de torque requerido para carro horizontal

O carro horizontal comporta o laser. Para movimentação, foi considerado o peso do laser, rolamentos e das placas para fixação feitas de plástico ABS em impressora 3D. O peso estimado foi de 238g, assim:

$$F = m * a = 0,238 * 9,81 = 2,3348N$$

$$T = F * b = 2,3348 * 0,0075 = 0,0175Nm$$

Conhecido os torques, foi feita uma pesquisa de mercado para seleção do motor de passo que atenda o projeto. A Tabela 5 lista motores de diferentes modelos e marcas.

Tabela 4 – Preço de diferentes modelos de motores de passo.

Modelo	Marca	Torque	Preço
AK17/1,10F6LN1.8	Neomotion	0,1078Nm	80,00
17HS4401	CE Rosh	0,40Nm	40,00 - 50,00
17HS3401	CE Rosh	0,28Nm	30,00
KTC-5017-008	Kalatec	0,12Nm	60,00

Fonte: Autoria própria.

O motor escolhido foi o 17HS3401, híbrido, bipolar, com torque de 0,28Nm e corrente de 1,3A. Foi identificado que o motor KTC-5017-008 também atende a exigência, porém possui custo bem mais elevado, o que levou a ser substituído. A Tabela 6 lista as especificações gerais do motor escolhido.

Tabela 5 – Informações sobre o motor de passo 17HS3401.

Propriedade	Valor
Ângulo de passo	1,8°
Número de passos	200
Corrente de funcionamento	1,3A
Resistência	2,4Ohm
Indutância	2,8mH
	28Ncm
Torque de retenção	1,6Ncm
Temperatura máxima de funcionamento	80 °C
Resistência de isolamento	100MΩ Min, 500VDC

Fonte: Construída a partir de Datasheet 17HS3401.

3.3 SELEÇÃO DE PLACA CONTROLADORA E DRIVER

De acordo com o datasheet do motor 17HS3401, a corrente de funcionamento é 1.3A, e foi fator mais importante para escolha da placa a ser utilizada, uma vez que a placa deve fornecer uma amperagem igual ou superior à do motor. A Tabela 7 lista modelos de placas, preços, drivers e softwares compatíveis.

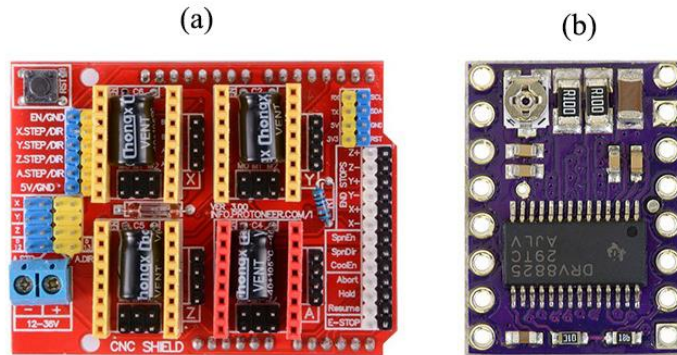
Tabela 6 – Modelos de placas, driver e softwares compatíveis.

Modelo	Características	Driver compatível	Software (gratuito)	Preço (R\$)
<i>Placa AKZ250</i>	3 eixos Drivers	TB6560 TB6600	Mach3 Linux CNC	500
<i>GT2560</i>	Arduino Mega2560 integrado Suporte para 5 eixos Software GRBL e LaserGRBL	A4988 DRV8825 TB6600 TB6560	Linux CNC	
<i>Breckout Board 5 e 6 eixos</i>	5 eixos Placa única	TB6560 TB6600 TB6560	Mach 3 Linux CNC	80,00
<i>Shield V3.0 e V4.0</i>		A4988 DRV8825 TB6600	Qualquer compatível com Arduino	
Arduino Shield	Necessita de Arduino	Integrado		130 a 170
Easy driver	Necessita Arduino	Integrado		

Fonte: Autoria própria.

Dentre a vasta gama, existe atualmente placas compatíveis com Arduino, hardware barato e fácil programar, desenvolvido para estudantes e projetistas amadores ou de diferentes áreas. Estas placas são simples e apresentam um ótimo desempenho, baixo custo e vasta variedade de softwares gratuitos para uso. Dentro deste contexto, a placa escolhida foi a *Shield V3*, e driver *DRV8825* como padrão de uso para Arduino UNO (Figura 18). Esta escolha está embasada no seu custo benefício. Outras opções de placas são: *MK3/4eixos* e *MK3/9eixos*, *NXMAX* e *StepMaster ver 2.5*, no entanto possuem custo mais elevado.

Figura 18 – Placa controladora Shield V3 (a) e driver DRV8825 (b).



Fonte: Adaptado de datasheet.

3.4 SELEÇÃO DE MATERIAL, PEÇAS CONSTRUTIVAS E CONEXÕES

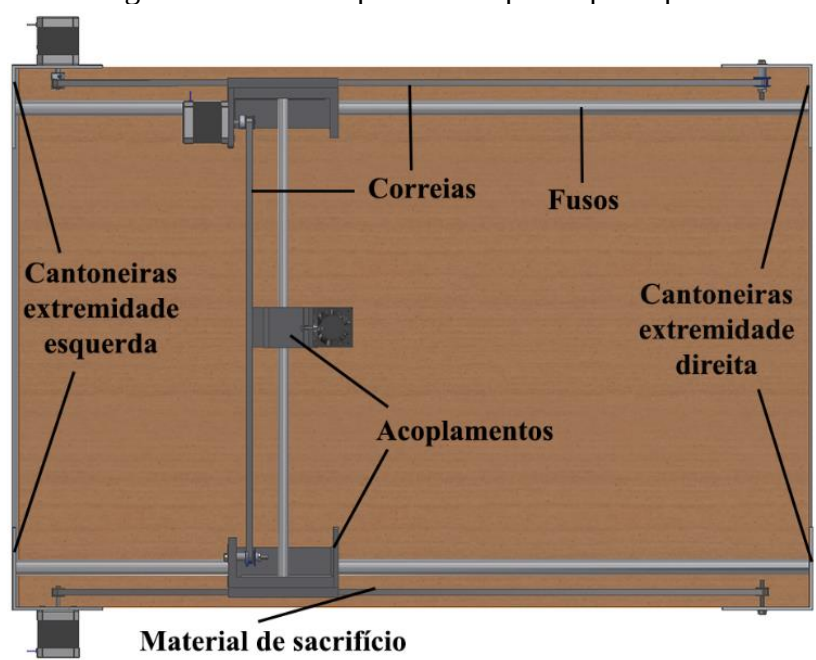
A Figura 19 apresenta a vista superior da máquina de corte, com partes estruturais principais nomeadas para referência ao longo do trabalho.

Inicialmente foi escolhido o sistema que possibilitasse a movimentação de partes da máquina, em que foi escolhido fusos de alumínio com rolamentos lineares, pela facilidade de movimentação, boa precisão de deslocamento e capacidade para suporta uma estrutura mais pesa, como uma mini retífica.

Para confecção das peças estruturais mais simples, como cantoneiras e fixadores, foi escolhido o alumínio, por ser prático para manufatura de peças e fixação, leve e fácil aquisição.

Os acoplamentos para conexão dos carros serão fabricados em impressora 3D, diminuindo custos mão de obra e tempo de serviço (Figura 19). Foi utilizado na base uma chapa de madeira mdf como material de sacrifício, para não danificar o ambiente onde a máquina for posta. Foi escolhido o mdf por apresentar baixo custo e fácil de adquirir no mercado local comparado com outros tipos de madeira.

Figura 19 – Vista superior com partes principais.



Fonte: Autoria própria.

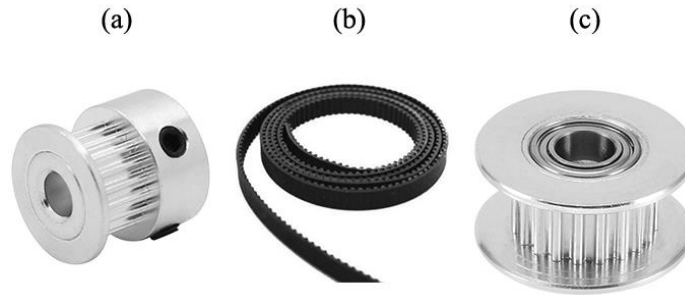
Como a máquina é leve, não possui contato entre ferramenta de corte e peça de trabalho, e há baixo atrito nas conexões. Desta forma foi escolhido o sistema com correia e polia para transmissão de força e velocidade (Figura 19). De acordo com Nardi (2018), este sistema também oferece menor custo sem perda de precisão.

Para transmissão de torque do motor para a correia foi escolhido a polia GT2 de alumínio (Figura 20), com passo de 2mm, 16 dentes (para aumento da precisão em cada passo, pois possui menor diâmetro), e 5mm de diâmetro interno – padrão para eixos de motores de passo nema 17 e compatível com correia GT2.

A correia escolhida foi a GT2, largura de 6mm, passo de 2mm (Figura 20), compatível com a polia escolhida. O baixo peso a ser deslocado levou a escolha da menor correia menor possível, pois diminui o custo sem afetar desempenho.

Na extremidade posterior do mecanismo, para possibilitar a fixação da correia bem como sua movimentação, foi selecionado a polia GT2 com rolamento interno, de 20 dentes, e 5mm de diâmetro interno (Figura 20). Esta polia é fixada na estrutura (cantoneira extremidade direita) por meio de um parafuso M5 de comprimento 25mm e arruelas separadoras demonstrado na Figura 27.

Figura 20 – Polia (a), correia (b) e polia com rolamento interno (c).



Fonte: Adaptado de mercadolivre.com.br.

3.5 ESCOLHA DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Primeiramente foi conhecido o consumo, corrente e tensão de funcionamento de cada componente. Considerando que o laser e os três motores funcionem ao mesmo tempo, o consumo total é.

$$\text{Potência total} = \text{Potência do Laser} + 3 * \text{Potência do motor de passo} = 15 + 3 * 7W = 36W$$

$$\text{Corrente total} = \text{Corrente do laser} + 3 * \text{corrente do motor de passo}$$

$$\text{Corrente total} = 3A + 3 * 1,3A = 6,9A$$

Assim, a fonte deve fornecer no mínimo 5,2A de corrente. Por motivos de custo e facilidade de obtenção, foi escolhido uma fonte de computador – ATX-450W P4, reutilizada. Além do custo, a fonte apresenta a vantagem fornecer tensões de 3,3, 5 e 12V, e conter sistema de arrefecimento próprio. No adesivo lateral (Figura 21) pode ser consultado a tensão de 12V com corrente de 16A, atendendo tranquilamente a exigência do projeto.

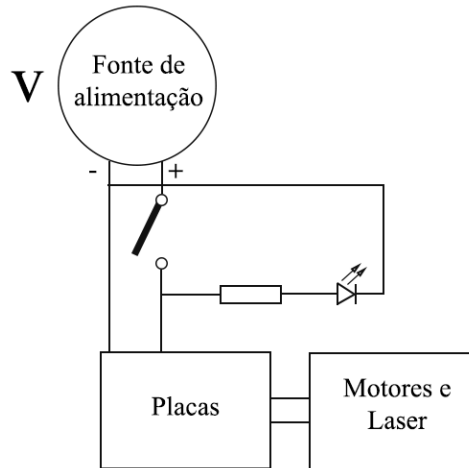
Figura 21 – Informações de tensão da fonte de alimentação ATX

SWITCHING POWER SUPPLY					
MODEL: ATX-450W P4					
AC~ I/P	110/230V~		10/5A		60/50Hz
DC O/P	+3.3V	+5V	+12V	-12V	+5VSB
	28A	45A	16A	1A	3.5A
+5V & +3.3V COMBINED LOAD 250W. .					
+5V & +3.3V & +12V COMBINED LOAD 430W.					
TOTAL OUTPUT IS 450W MAX.					
CAUTION!					
.DO NOT REMOVE THIS COVER.					
.SELECT THE RIGHT VOLTAGE.					
080822522					

Fonte: Autoria própria.

Por segurança, foi utilizado uma chave liga-desliga para interrupção da passagem de corrente que alimenta o sistema. Na linha, foi utilizado um LED de cor verde conectado após o interruptor, para indicar quando o sistema está sendo alimentado. O led é do tipo difuso, 5mm de diâmetro, cor verde, tensão de 2V e corrente de 20mA (Figura 22).

Figura 22 – Diagrama elétrico.

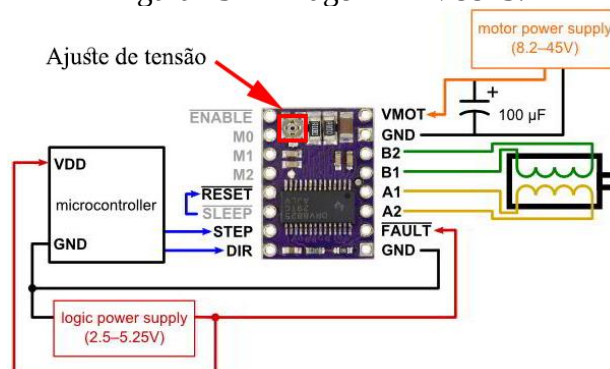


Fonte: Autoria própria.

3.6 DETALHES PARA MONTAGEM DA PLACA CONTROLADORA E DRIVERS

O *Driver DRV8825* e a função de cada pino são ilustrados na Figura 23. Este driver permite operar motores de passo bipolares com passos: completo, 1/2, 1/4, 1/8 1/16 e 1/32. A tensão de saída chega a 45V nos pinos de conexão do motor (A1, B1, A2, B2), e deve ser ajustada com o auxílio de um multímetro através do pino de ajuste (Figura 23) de acordo com a corrente de funcionamento do motor.

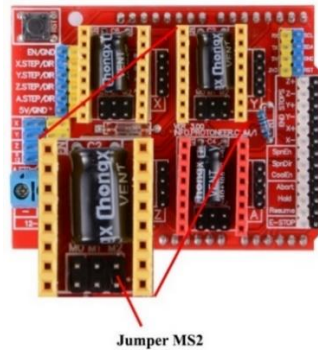
Figura 23 – Pinagem DRV8825.



Fonte: Adaptado de arduinoecia.com.br

Para o driver enviar sinais compatíveis ao paço do motor, deve ser conectado jumpers na Shield V3, em que os jumpers permitem a passagem de eletricidade para os pinos corretos do driver. O motor escolhido funciona com 1/8 de passo, e na placa Shield V3 o jumper MS2 deve ser plugado no local indicado na Figura 24 (datasheet Shield V3).

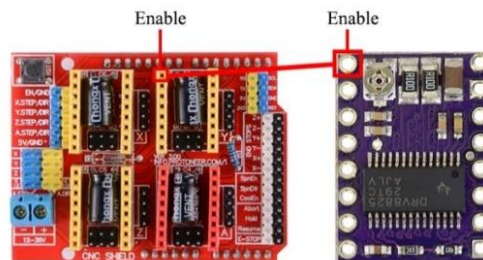
Figura 24 – Conexão de jumper.



Fonte: Adaptado de datasheet.

O driver é conectado (posto) diretamente na placa Shield V3, atentando para que o pino **Enable** do Driver DRV8825 esteja na conexão **Enable** da placa de acordo com a Figura 25 (NARDI, 2014).

Figura 25 – Posicionamento DRV8825 na Shield V3.



Fonte: Adaptado de dataset.

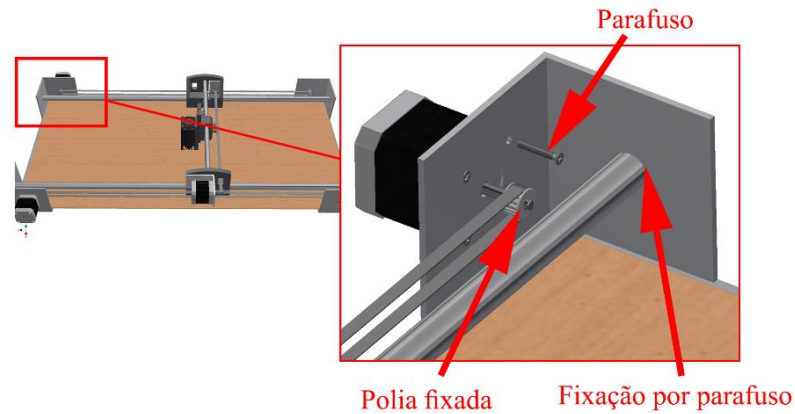
O esquema elétrico de ligação de todos os componentes está ilustrado no Anexo I.

3.7 DETALHES PARA MONTAGEM ESTRUTURAL

A base é composta por dois fusos de 16mm unidos a cantoneiras e duas chapas de alumínio inferiores. As cantoneiras da extremidade esquerda devem ser produzidas com as dimensões disponíveis em Anexo I – Planta Cantoneiras extremidade esquerda. Está acoplado

à esta cantoneira um motor de passo e um fuso. O motor de passo é parafusado com quatro parafusos M3 e o fuso é soldado (Figura 26).

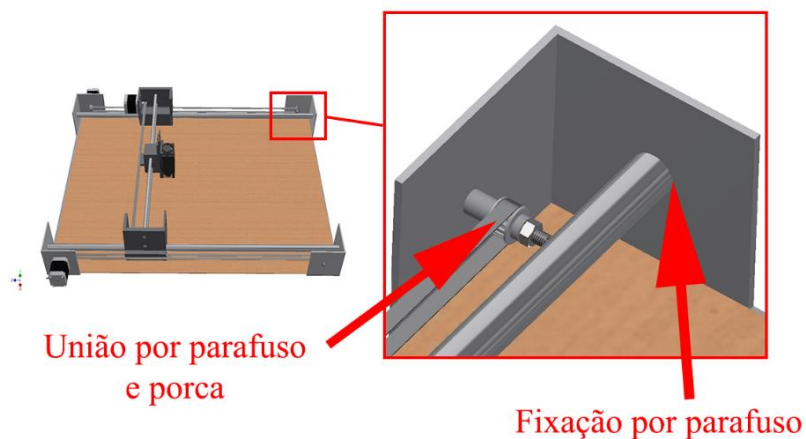
Figura 26 – Montagem cantoneira extremidade esquerda.



Fonte: Autoria própria.

É conectado nas cantoneiras da extremidade direita um parafuso com polia para fixar a correia (Figura 28) e fuso para movimentação do carro. Acoplado à cantoneira está o fuso e conjunto parafuso para posicionamento da polia com rolamento (Figura 27).

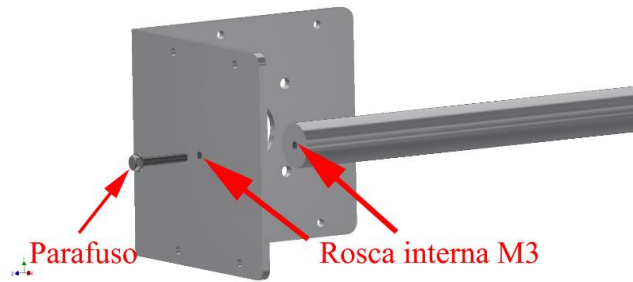
Figura 27 – Montagem cantoneira extremidade direita.



Fonte: Autoria própria.

Para melhor entendimento, a conexão do fuso e cantoneira com uso do parafuso é ilustrado na Figura 28, onde é aberto uma rosca interna no fuso e na cantoneira.

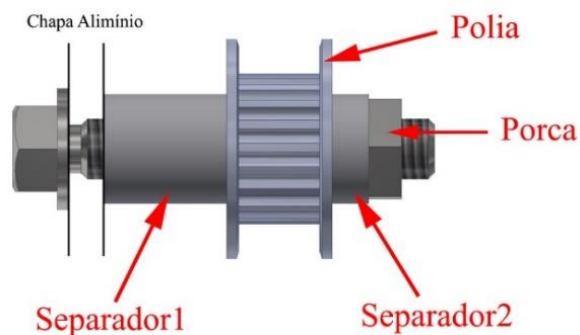
Figura 28 - Conexão fuso e cantoneira esquerda.



Fonte: Autoria própria.

A polia com rolamento é montada no parafuso junto com dois separadores que possibilitam sua rotação. O parafuso utilizado é um M5 com 35mm de comprimento, fixado com porca, e os separadores são feitos de plástico ABS em impressão 3D. A montagem do parafuso deve estar de acordo com a Figura 28. Consultar Anexo I para dimensões do Separadores 1 e 2.

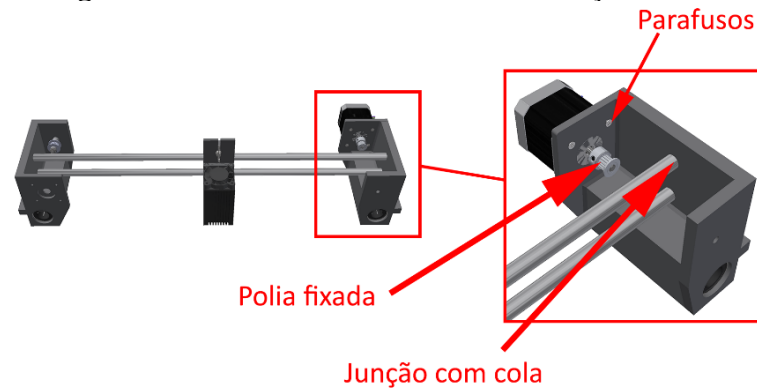
Figura 29 – Montagem parafuso.



Fonte: Autoria própria.

Na parte direita do cabeçote móvel é responsável por movimentação do laser. Os fusos são posicionados e colados com cola de secagem rápida no acoplador. O motor de passo é parafusado junto ao acoplador com parafusos M3x20 (Figura 29). Para detalhes de montagem e quantidade de peças, consultar Anexo II.

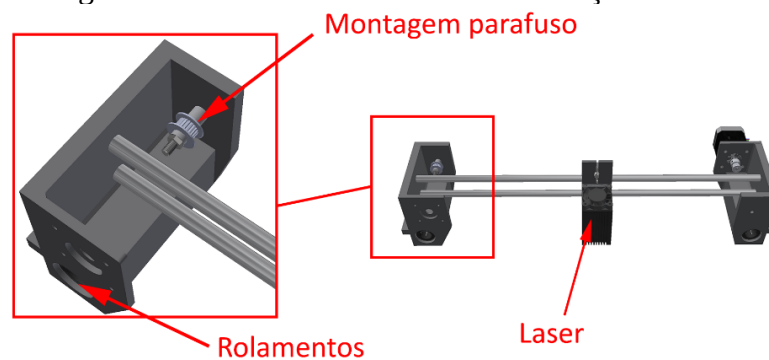
Figura 30 – Detalhes de conexões do cabeçote móvel.



Fonte: Autoria própria.

Na parte esquerda, a correia é montada no conjunto parafuso, acopladores, polia com rolamento e porca. Rolamentos lineares são montados nos acopladores para possibilitar deslizamento (Figura 30). O laser é fixado à sua base que é fixada no acoplador com rolamento com uso de um parafuso, que possibilita ajuste de altura que deve ser alterado de acordo com a espessura do material. Para detalhes de montagem e quantidade de peças, consultar Anexo II.

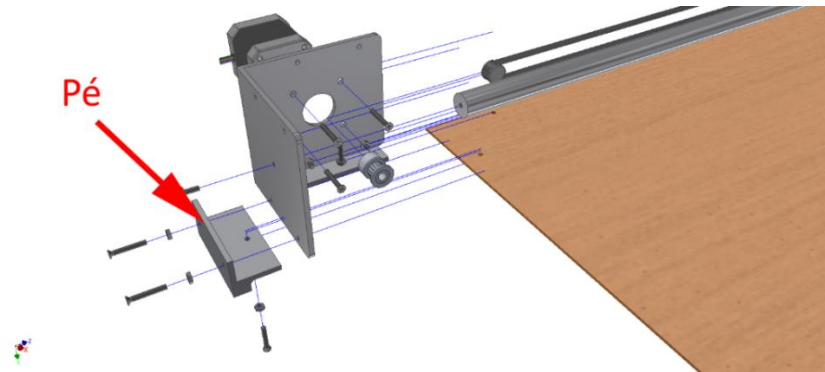
Figura 31 – Detalhes de conexões de cabeçote móvel.



Fonte: Autoria própria.

Para montagem da base é utilizado pés que são fixados com parafuso M3, e porcas na cantoneira de alumínio e no material de sacrifício, como ilustra a Figura 31 com uma vista explodida de um dos lados da máquina. As dimensões dos pés estão em ANEXO I.

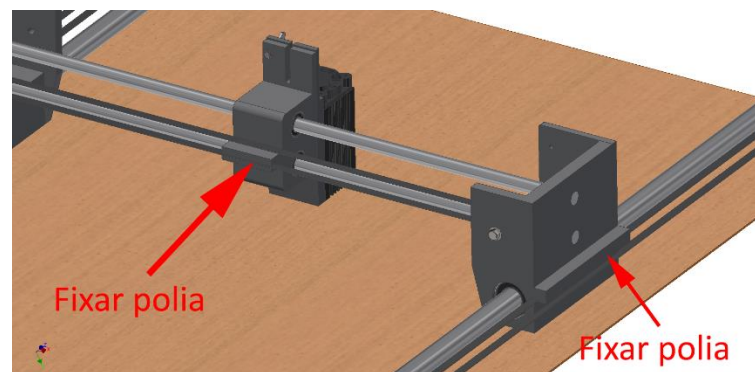
Figura 32 – Vista explodida de canto da extremidade esquerda.



Fonte: Autoria própria.

Para fixar a polia, há no acoplador uma área lateral deixada propositalmente para que a polia seja fixada. A polia deve ser fixada na parte inferior, havendo uma pequena inclinação da correia que fica tensionada, tornando o movimento mais preciso (Figura 32).

Figura 33 – Fixação polia.

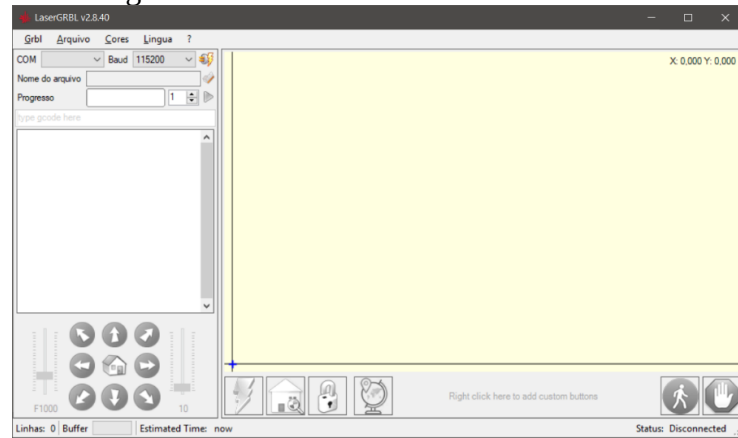


Fonte: Autoria própria.

3.8 ESCOLHA DO SOFTWARE

Para interface do usuário e a máquina é utilizado o software “*LaserGRBL*” (Figura 33). É utilizado o *LaserGRBL* por ser prático, compatível com Arduino, interface intuitiva, simples de usar, e possibilidade de vetorização automática de imagem para gravações laser (GITHUB, 2018). Há diversas outras plataformas livres, como o LinuxCNC, GRBL Controller, Universal G Code Sender, Planet CNC, bCNC, SourceRabbit GCode Sender, mach3, no entanto, não tão vantajosas. Para que o *LaserGRBL* consiga se comunicar com o Arduino, é necessário fazer upload do Software *GRBL* no Arduino UNO (APÊNDICE III), responsável por controlar o movimento os movimentos da máquina (SKOGRUD, 2018).

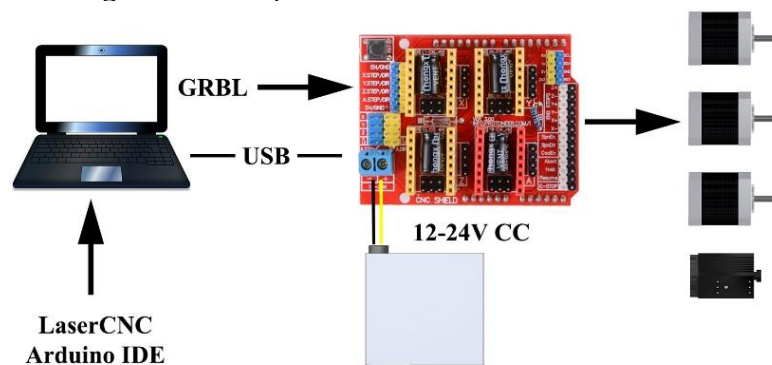
Figura 34 – Interface software LaserGRBL.



Fonte: Autoria própria.

Assim, os sinais viajam da seguinte maneira: o código G ou foto é carregado no LaserGRBL instalado no computador; Através do Arduino IDE, o GRBL é enviado para a placa Arduino, que em seguida envia sinais para Shiled V3 e DriverDRV8825 para entregam aos motores e laser de forma regulada (Figura 34). Para instalar Arduino IDE e Laser GRBL, consultar Apêndice III.

Figura 35 – Etapas de funcionamento do software.



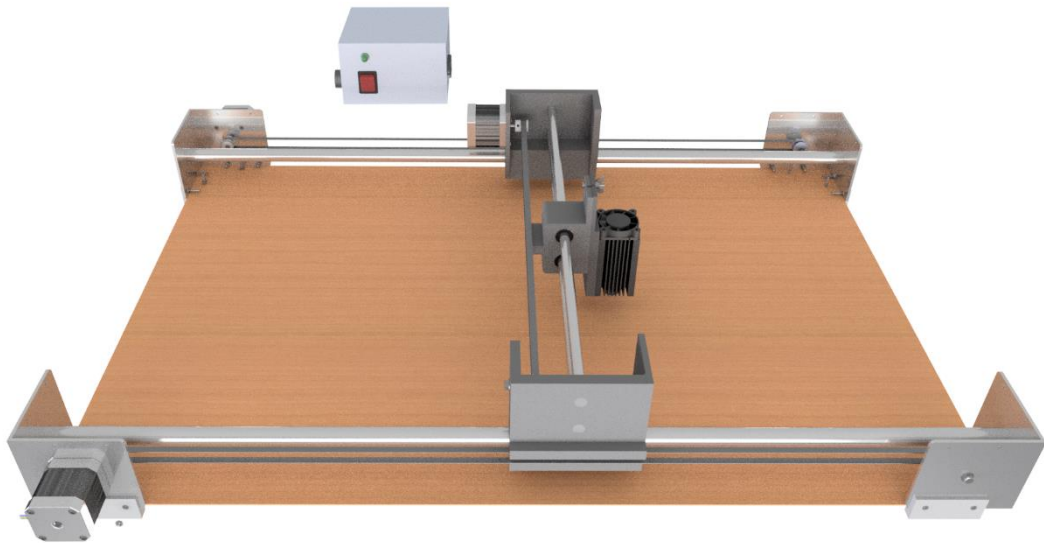
Fonte: Autoria própria.

O posicionamento dos fios elétricos fica a critério do montador.

4 RESULTADOS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho contempla o projeto de uma máquina de corte a laser, e o resultado está ilustrado na Figura 35, que trata de uma modelagem feita no software Autodesk inventor com todos os componentes mecânicos posicionados, mostrando como seria a máquina.

Figura 36 – Modelagem da máquina.



Fonte: Autoria própria.

A montagem final da máquina conta com peças de fácil fabricação e montagem. O uso de fusos para movimentação dos carros permite uma futura troca da ferramenta de corte para uma mini retífica, possibilitando o corte de madeira mais espessa e ainda outros materiais como acrílico, tornando a máquina multifuncional.

A máquina apresenta tamanho compacto com baixo peso, e pode ser mudada de lugar facilmente, facilitando seu manuseio e transporte após montada. Isso possibilita o uso em competições, em que reparos devem ser feitos na aeronave decorrente de acidentes imprevistos.

Com projeto em mãos, pode-se aprimorar as conexões elétricas, posicionando fios e fonte de alimentação acoplado a máquina, facilitando transporte. Pode ser trabalhado na construção da máquina, em que sugestões de melhora surgirão.

5 CONCLUSÕES

O projeto da máquina de corte a laser CNC atingiu os resultados esperados, com a integração de um projeto eficiente e de baixo custo. Através da fundamentação teórica, foi esclarecido os princípios gerais da tecnologia laser, tecnologia CNC e corte de materiais, além do aprimoramento de conhecimentos básicos em eletrônica.

Foi feito cálculos para dimensionamento do laser, motores de passo e componentes eletrônicos necessários, aprimorando as habilidades de.

Conheceu-se novas habilidades de desenvolvimento de projeto com o entendimento das etapas de desenvolvimento de produto até não conhecidas, em que o conceito de estudo de viabilidade, projeto preliminar, projeto detalhado foram entendidos e aplicados.

Realizou-se pesquisa de mercado e escolha de peças que apresentassem melhor custo benefício, ou que pudessem ser reutilizadas, desenvolvendo a ideia de trabalhar com limitação de recursos.

Por fim, o trabalho pode ser utilizado como fonte de pesquisa e aprendizado para alunos que busquem conhecimentos nesta área, bem como base para desenvolvimento de projetos mais complexos e futura aplicação no mercado de trabalho.

REFERÊNCIAS

- ARTEAGA, Frank J.. **The importance of focal positions in laser cutting**. 2010. Disponível em: <<https://www.thefabricator.com/article/lasercutting/the-importance-of-focal-positions-in-laser-cutting>>. Acesso em: 22 dez. 2017.
- BACHMANN, Friedrich; POPRAWE, Reinhart; LOOSEN, Peter. **High Power Diode Lasers: Technology and Applications**. New York: Springer, 2007.
- CHRYSSOLOURIS, George. **Laser Machining: Theory and Practice**. New York: Springer, 1991.
- DIAS, Matheus Borges. **PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA DE CORTE A LASER PARA FACILITAR A PROTOTIPAGEM**. 2015. Disponível em: <<http://bdm.unb.br/handle/10483/13610>>. Acesso em: 20 dez. 2017.
- DAHOTRE, Narendra B.; HARIMKAR, Sandip P.. **Laser Fabrication and Machining of Materials**. Knoxville: Springer, 2008.
- DELGADO NETO, Geraldo Gonçalves; DEDINI, Franco Giuseppe. Sistemática e Metodologia de Projeto: Uma abordagem para o desenvolvimento de produtos. In: CONEM, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos., 2010, Campina Grande. **VI Congresso nacional de engenharia mecânica**. Campina Grande: Abcm, 2010. p. 1 - 10.
- SKOGSRUD, Simen Svale. **Flashing Grbl to an Arduino**. Disponível em: <<https://github.com/gnea/grbl/wiki>>. Acesso em: 23 mar. 2018.
- ESTRELA, José Miguel Alves. **Racionalização da Máquina de Corte a laser CCL 3015 na ADIRA S.A.** 2009. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Portugal, 2009. Cap. 6. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10216/66717>>. Acesso em: 14 dez. 2017.
- ESAB. **What is cutting kerf?** Disponível em: <<http://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-is-cutting-kerf.cfm>>. Acesso em: 22 jan. 2018.
- ELECTROX, Tykma. **8 Tips for selecting the right laser marking system**. Disponível em: <<https://www.permanentmarking.com/wp-content/uploads/8-Tips-for-Selecting-the-Right-Laser-System.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2017.
- FIGUEROA, Manuel Jesús Manriquez; MORAES, Poliana Dias de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Aa**, Florianópolis, v. 4, n. 9, p.157-174, 05 nov. 2009.

GITHUB. **LaserGRBL**. Disponível em: <<http://lasergrbl.com/en/>>. Acesso em: 23 mar. 2018.

LIU, Xingsheng; ZHAO, Wei; XIONG, Lingling. **Packing of High Power Semiconductor Lasers**. New York: Springer, 2015.

MAKEITFROM. **Balsa: Mechanical Properties**. Disponível em: <<https://www.makeitfrom.com/material-properties/Balsa>>. Acesso em: 05 mar. 2018.

NEOMOTION. **Datasheet de produto: Motores de passo**. Disponível em: <<http://www.neomotion.com.br/motor-de-passo/>>. Acesso em: 06 dez. 2017.

NARDI, Marlon. **Construa sua própria CNC 3.0**. 2014. Disponível em: <<https://www.marlonnardi.com/p/cosntrua-sua-p.html>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

RESENDE, Prof. Rodrigo R. et al. **Biotecnologia aplicada à agro&indústria: fundamentos e aplicações**. São Paulo – Sp: Edgard Blücher, 2016. 4 v.

RIBEIRO, Dr. Jean Marcos de Souza. **Motor de passo**. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula3-motor-de-passo-2013-1-13-03-2013-final.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

SINGH, Subhash Chandra et al. **Nanomaterials: Processing and Characterization with Lasers**. Dublin-glasnevin Ireland: Wiley-vhc, 2012.

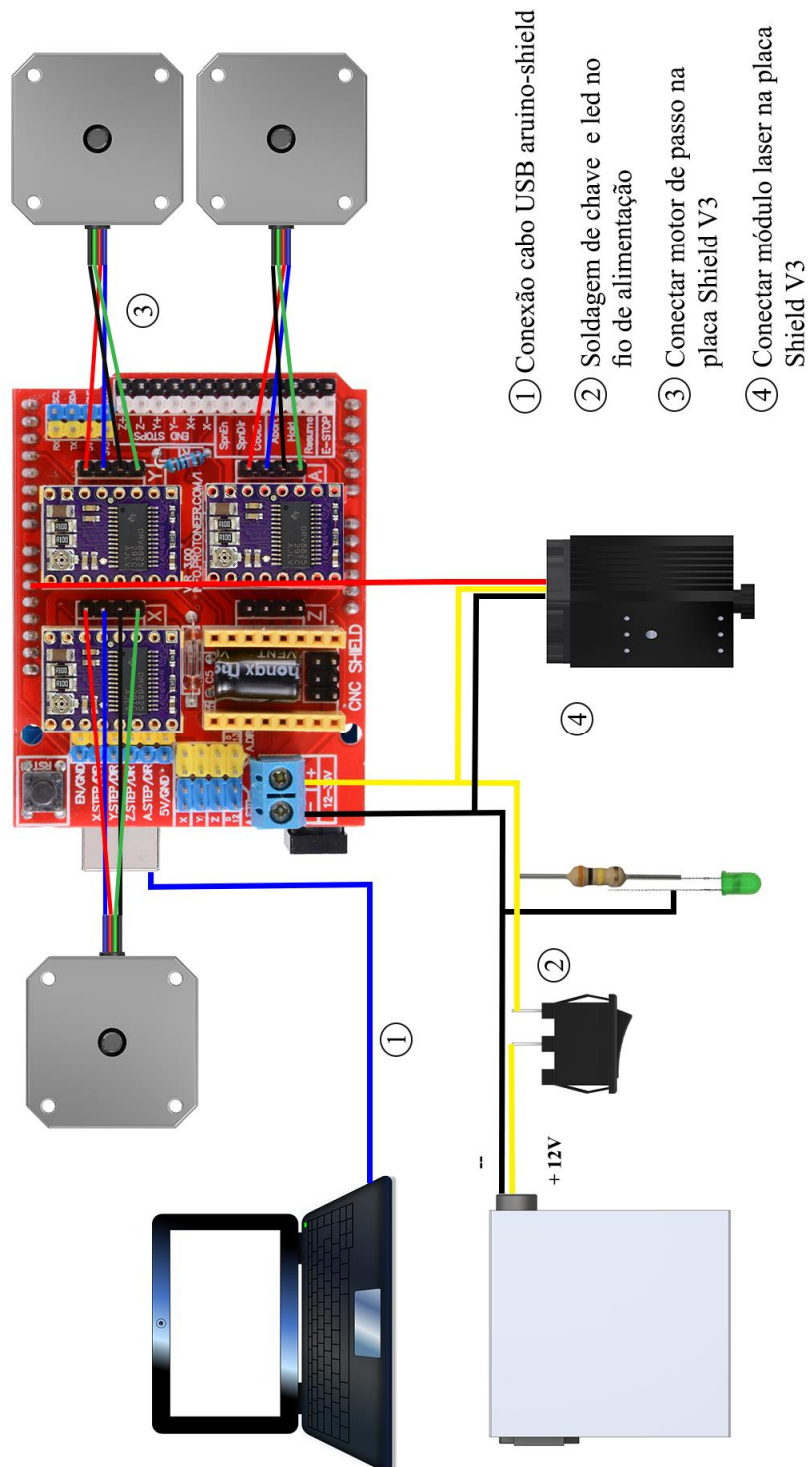
SUH, Suk-hwan. **Theory and Design of CNC systems**. London: Springer, 2008. 455 p.

SAUCEDO, Francisco Villarreal; CHANN, Bien; SAMSON, Bryce. **Direct diode vs. other laser systems used in laser cutting**. 2016. Disponível em: <<https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-31/issue-2/features/direct-diode-vs-other-laser-systems-used-in-laser-cutting.html>>. Acesso em: 28 dez. 2017.

TOOLBOX, The Engineering. **Latent Heat of Melting for some common Materials**. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/latent-heat-melting-solids-d_96.html>. Acesso em: 12 jan. 2018.

WETTER, N. U.; ROSSI, W. de. **ICS Lectures on Industrial Application of Lasers**. Vienna: Unido, 2000. 105 f. Disponível em: <<https://open.unido.org/publications>>. Acesso em: 16 dez. 2017.

APÊNCIDE I – DIAGRAMA DE CONEXÕES DOS COMPONENTES



APÊNDICE II – MEMORIAL DE CÁLCULOS

Planilha.

Símbolo	Descrição	Valor
c	heat capacity	464100
δv	proportion of vaporized kerf volume	0
Tp	process temperature	600
T0	room temperature	30
Ts	surface temperature of the cutting front	31
bm	mensures from kerf cross section	0,00003
s	material thickness	0,0015
vc	cutting speed	0,01
p	mass density	130
ϵm	latent heat of fusion	1
ϵv	latent heat of evaporation	1
Tm	melting temperature	600
k	average thermal diffusivity in the solid state	1
Pe	Pleacet number	0,000000015
K0	Modified Bessel function	1
P_{TP}	power for heating the kerf volume up to the process temperature	15,4754145
PI	power for compensating heat conduction losses into the material beside the kerf	8,728E-13
Pm	power for melting the kerf volume	5,85E-08
Pv	power for evaporation (part) of the kerf volume	0
PC	Total amount of power	15,47541456

Resistência para led: Como o led trabalha com 0,02A de corrente, foi necessário usar um resistor. Para cálculo, foi utilizado a expressão da resistência:

$$R = \frac{V_{\text{alimentação}} - V_{\text{led}}}{I} = \frac{5 - 2}{0,02} = 150\Omega$$

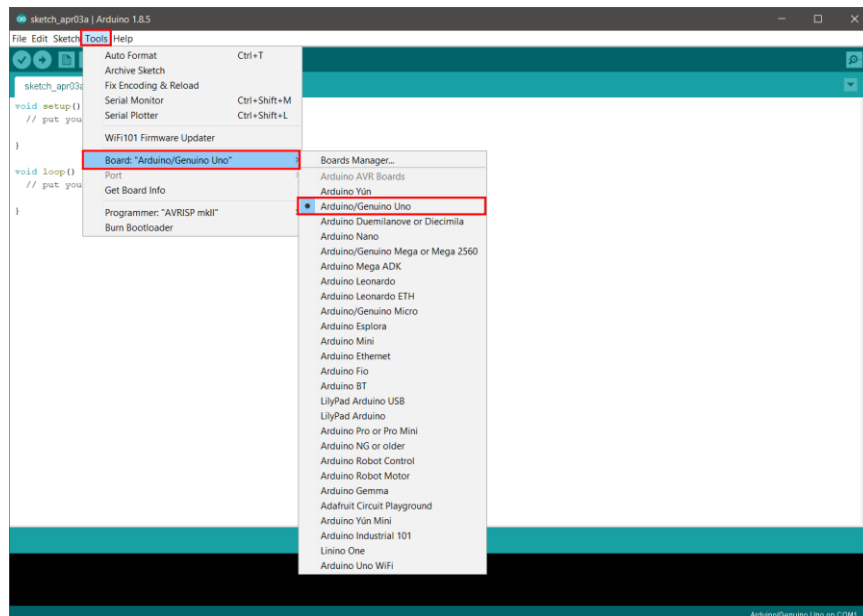
APÊNDICE III – CONFIGURAÇÃO DE SOFTWARES

DOWNLOAD DE SOFTWARES

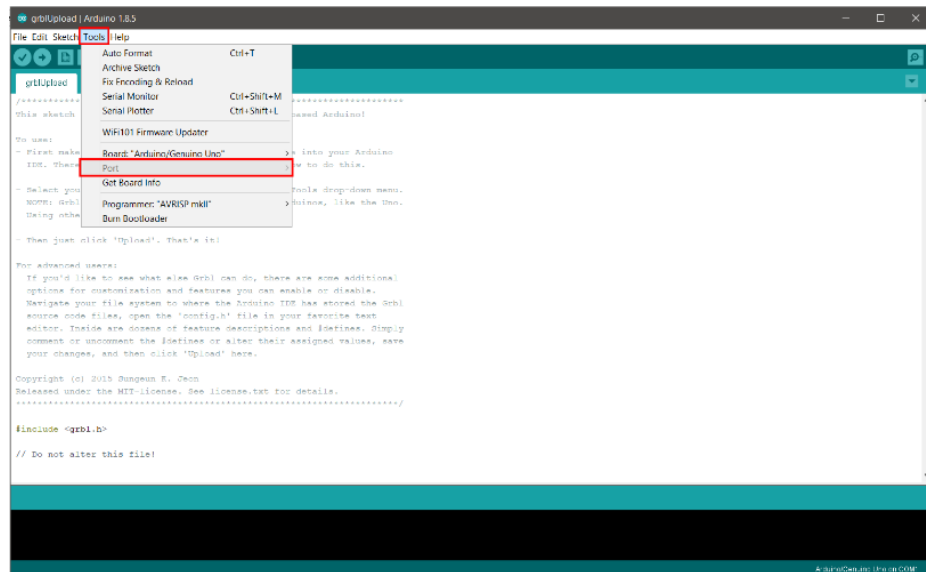
1. Download do GRBL V1.1 no site <https://github.com/gnea/grbl>. Descompactar no computador de uso.
2. Download do programa “*LaserGRBL*” no site oficial - <http://lasergrbl.com/en/>. O arquivo deve ser descompactado e instalado no computador de uso, e foi desenvolvido para GRBL V1.1.
3. Download do software Arduino IDE e instalar no computador.

PREPARO ARDUINO

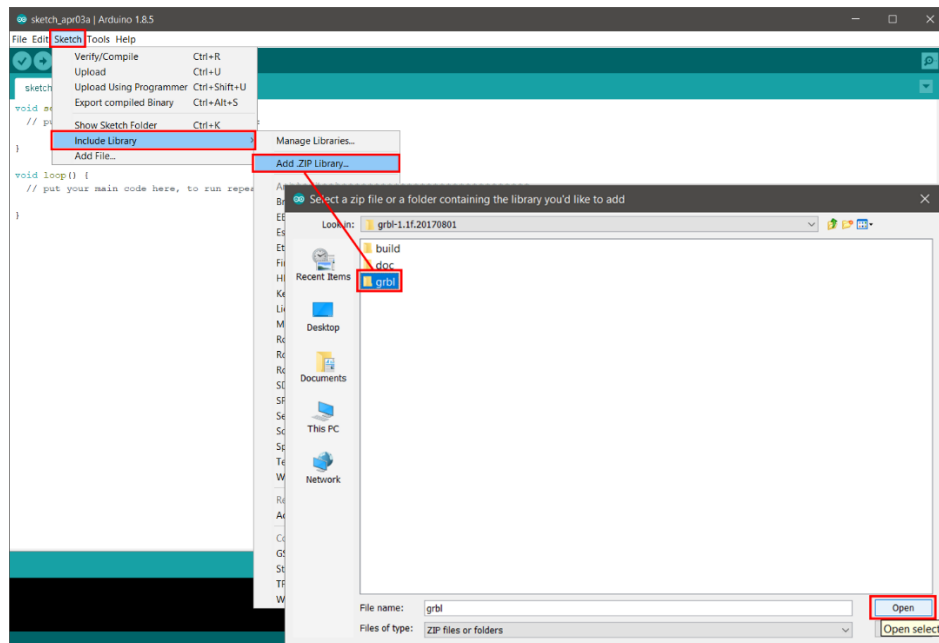
Passo 1: Com Arduino IDE instalado, conectar o cabo da placa na USB do computador e executar o software. Em seguida, selecionar o tipo de Arduino (*hardware*) em uso, neste caso *Arduino Uno*.



Passo 2: Selecionar a porta USB que está sendo utilizada. Esta etapa ordena o Arduino por onde os dados devem ser trafegados.



Passo 3: Adicionar o arquivo GRBL V1.1 baixado como biblioteca Arduino, e depois carregar a biblioteca no ambiente virtual IDE. Isto permite a comunicação entre o Arduino e a Shield V3.



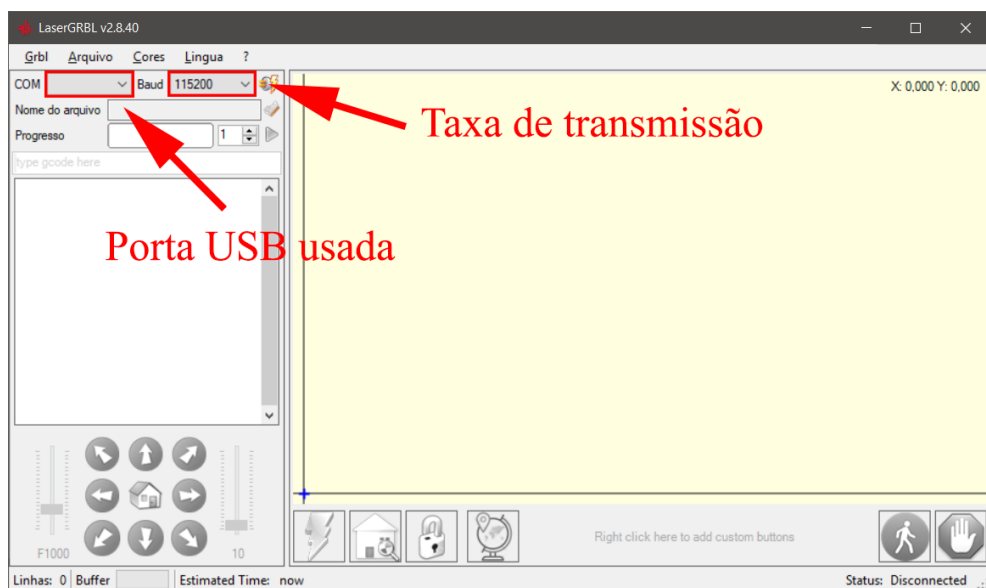
Passo 4: Enviar GRBL para Arduino clicando na seta “enviar”. O processo pode ser acompanhado na barra verde no canto inferior direito da tela.



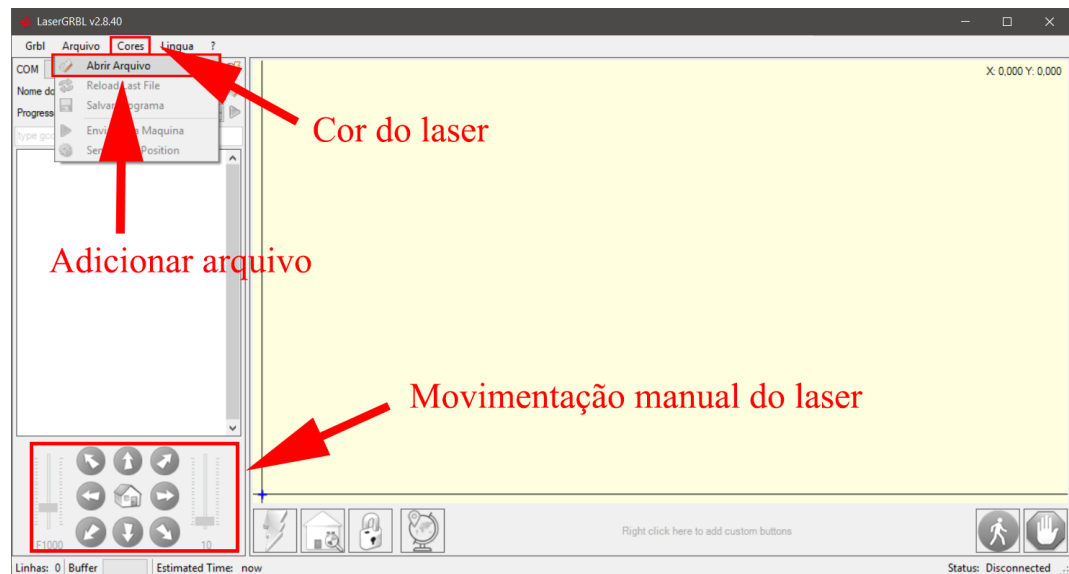
Grande parte destas informações foram pesquisadas em Nardi (2014). Para mais informações sobre habilitação/desabilitação do modo laser e configuração de ajuste do grbl, visitar o site oficial - <https://github.com/gnea/grbl/wiki>.

PREPARO LASERGRBL

Passo1: Executa o software e escolhe a porta usb que está sendo utilizada, de acordo com a do Arduino. Deve ser escolhido a taxa de transmissão de dados usada pelo firmware, para este caso 115200 (lasergbrl.com).



Passo2: Adicionar arquivo para corte ou gravação, o tipo de laser na aba “cores” e, caso não configurado, ajustar o posicionamento inicial - ponto (0,0) - do laser.



OBS: Para informações detalhadas sobre carregamento de imagem, quantidade de passos, ajuste de velocidade, ferramenta de vetorização etc, visitar o site oficial - <http://lasergrbl.com/en/>.

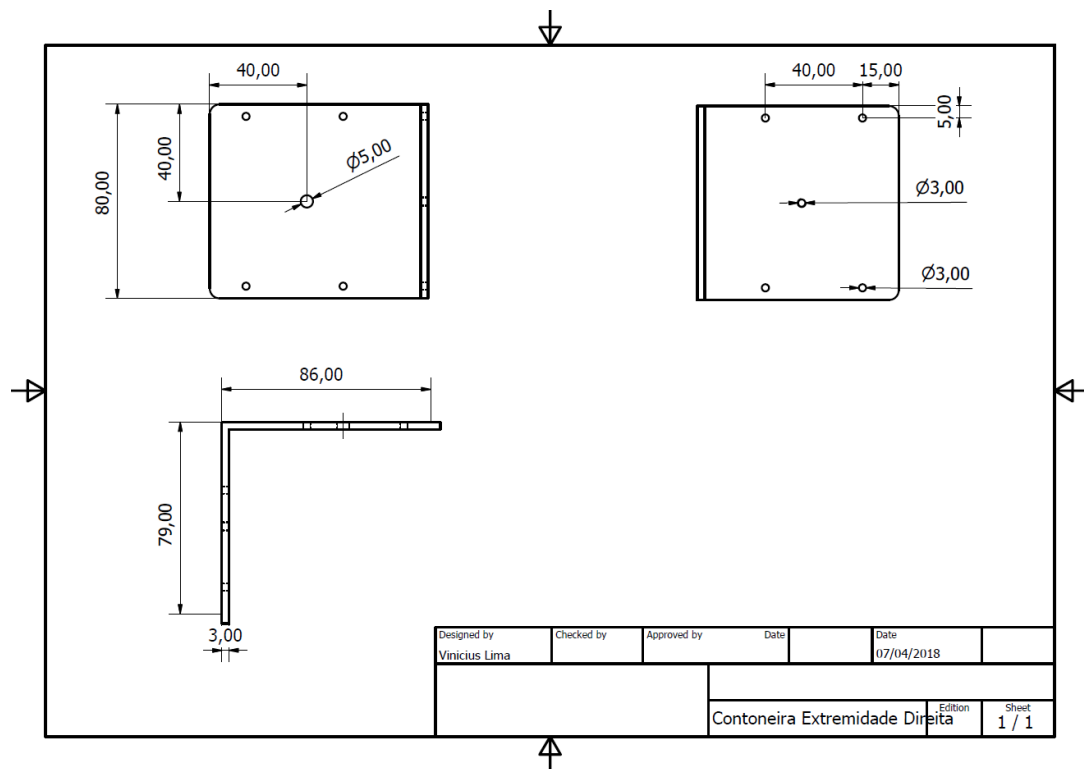
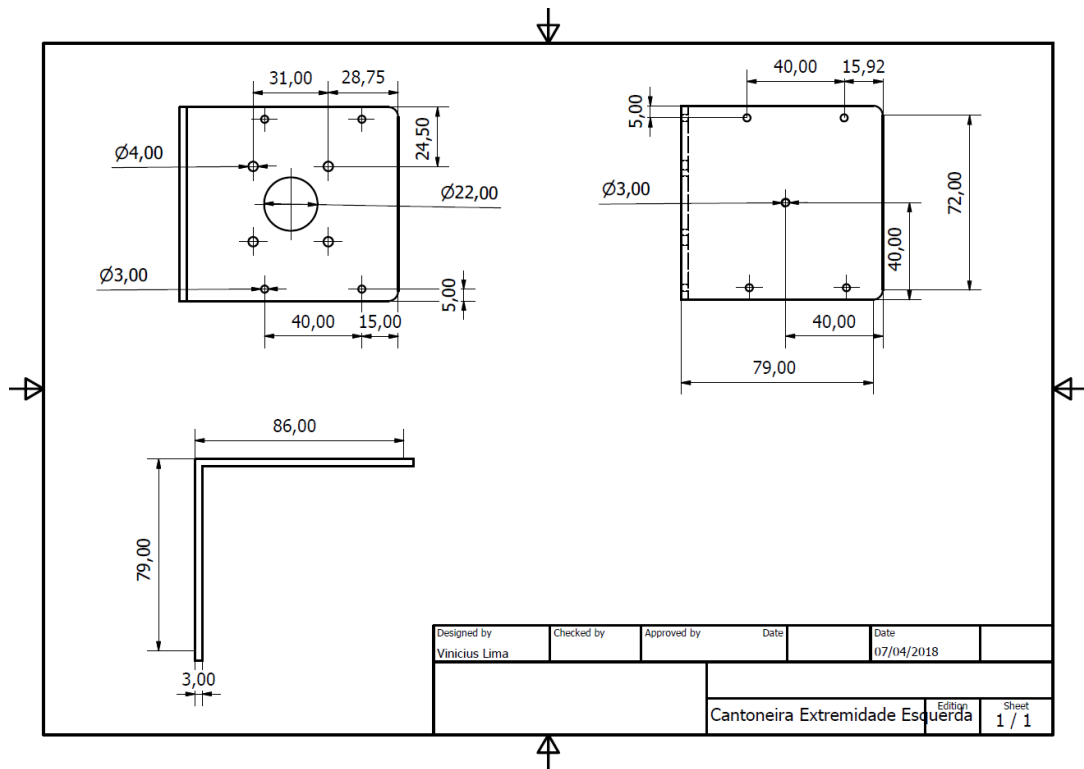
PREPARO DA MÁQUINA E EXECUÇÃO

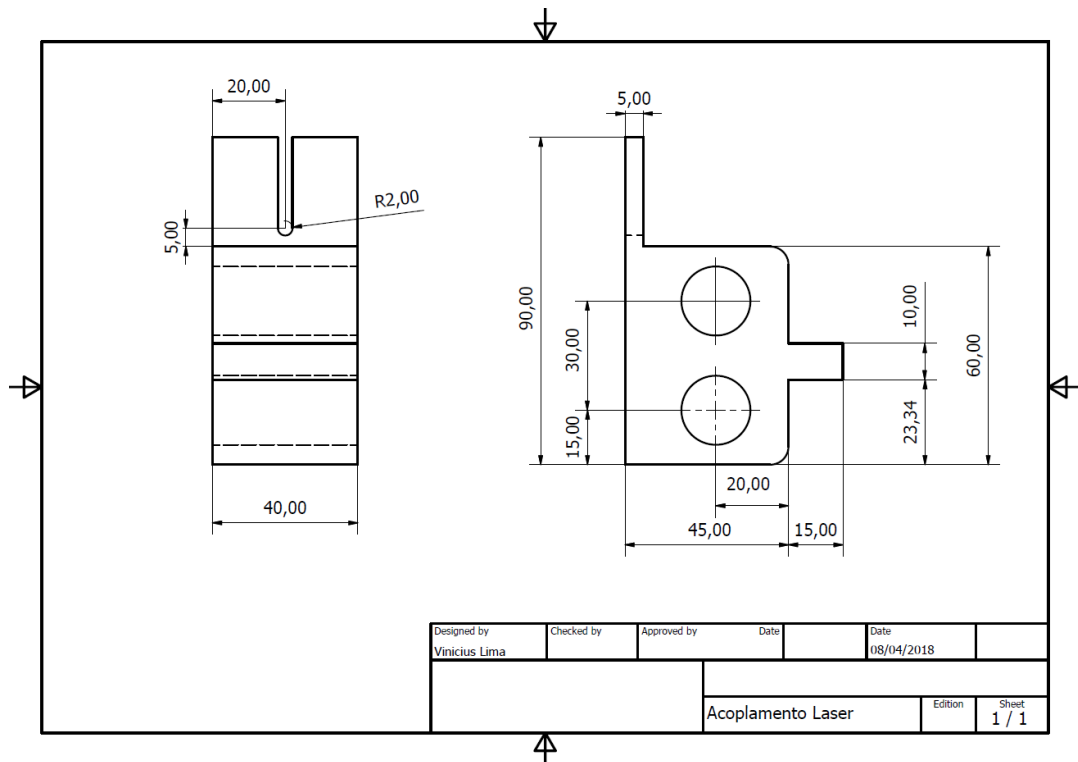
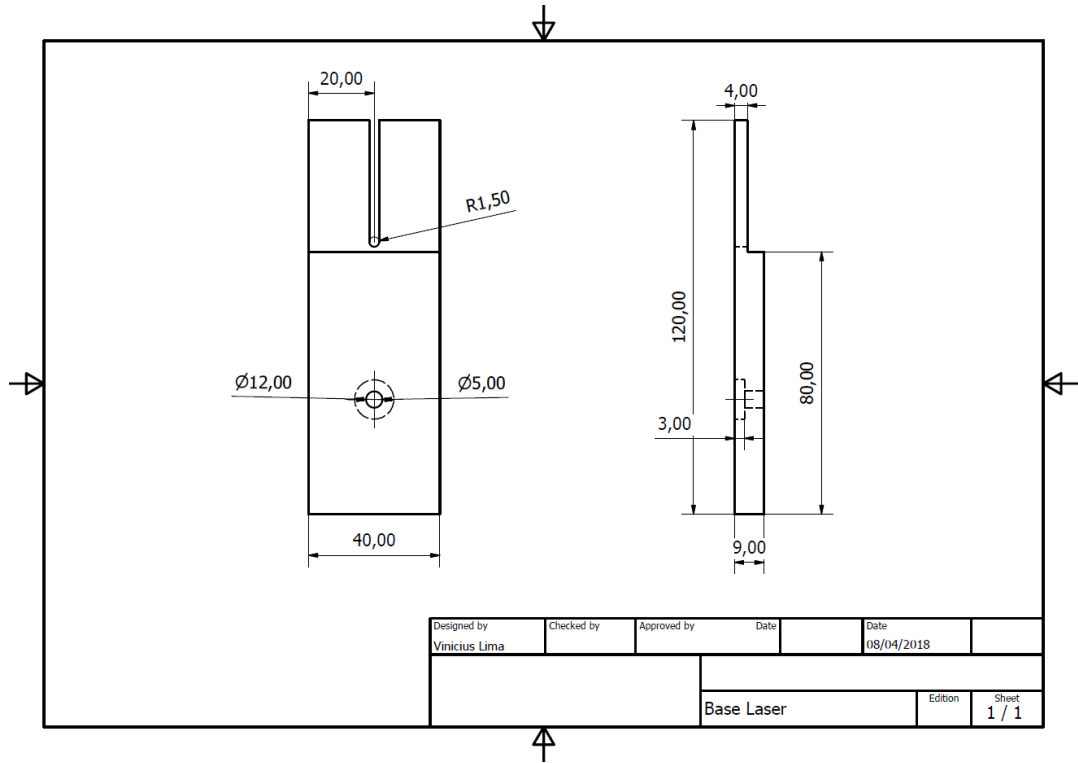
1. Com motores desligados, posiciona o cabeçote do laser na origem – ponto (0,0) escolhido pelo “montador”. No desenho CAD, a origem é a interseção entre X e Y
2. Montagem das placas (ANEXO I)
3. Upload de GRBL no Arduino e configuração do Arduino IDE (ANEXO IV)
4. Gera o G-Code da forma desejada em um software CAM, ou realiza upload de imagem a ser gravada no LaserGRBL (ANEXO III)
5. Posiciona a peça a ser processada e executa a tarefa

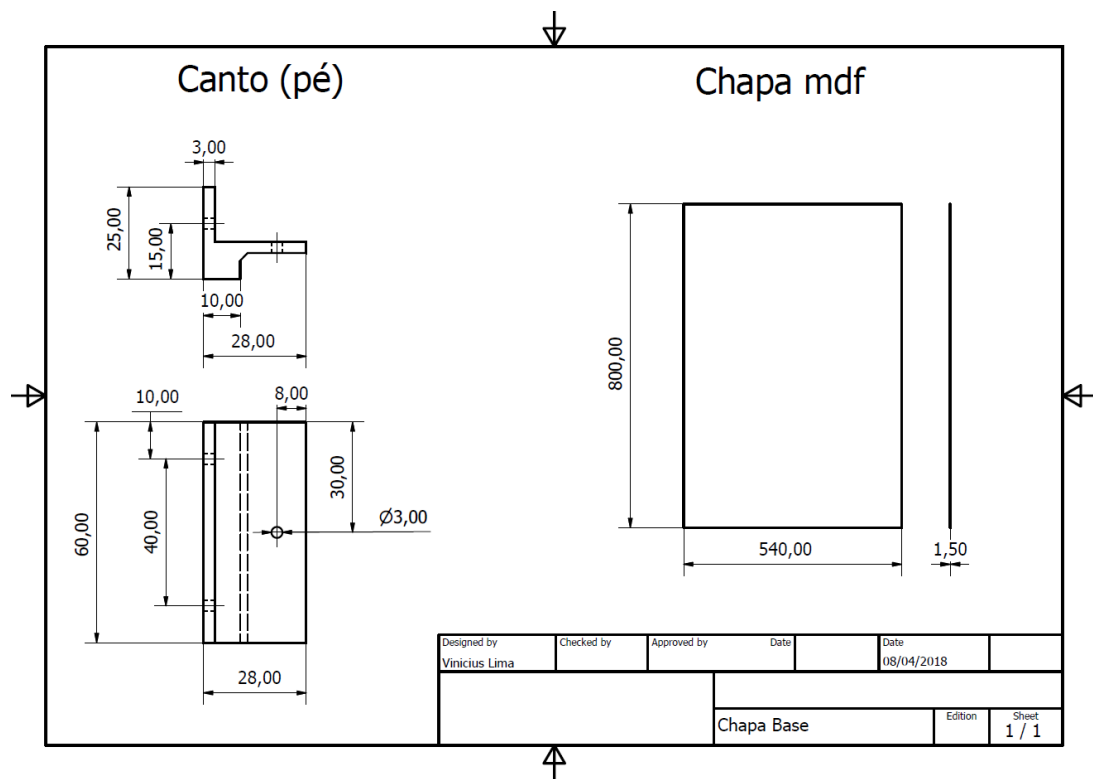
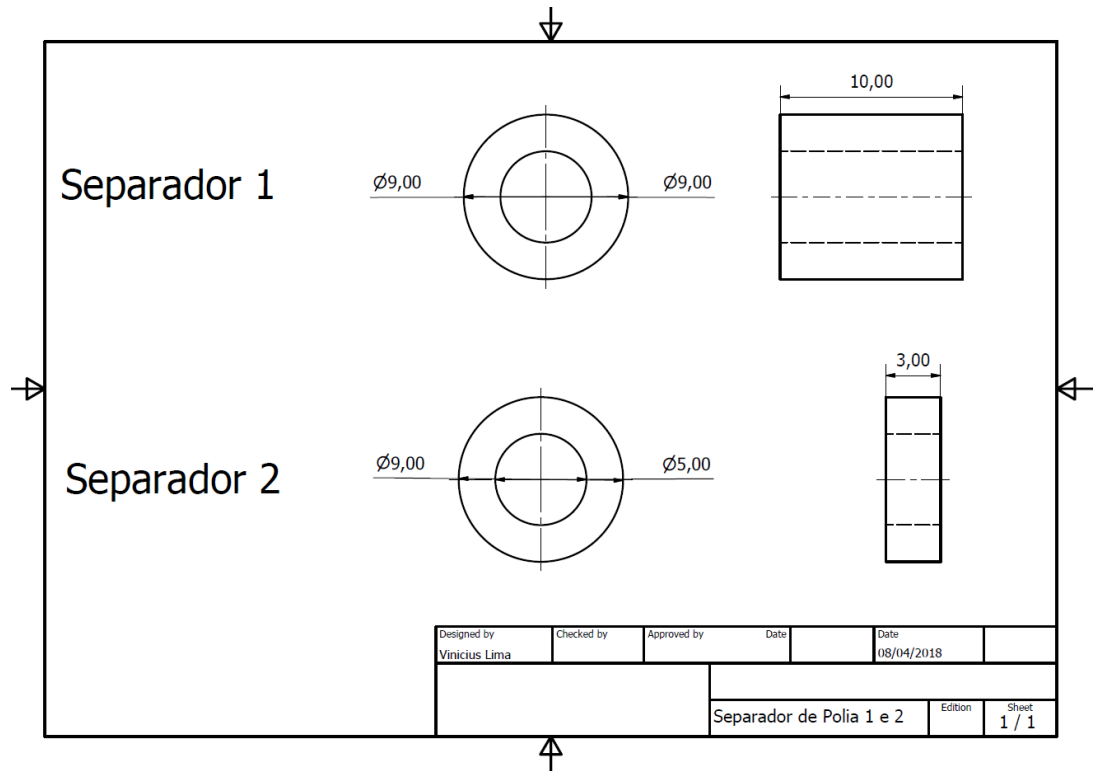
CUIDADOS

- Deve-se usar óculos especiais nas proximidades da máquina quando esta estiver em funcionamento, para proteger os olhos contra a forte radiação emitida pelo laser.
- Evitar o corte de materiais que contenham cloro, pois danifica o sistema laser. Para mais informações de quais materiais não cortar, acessar <https://www.troteclaser.com/en/knowledge/faqs/unsuitable-materials-laser-processing/>.

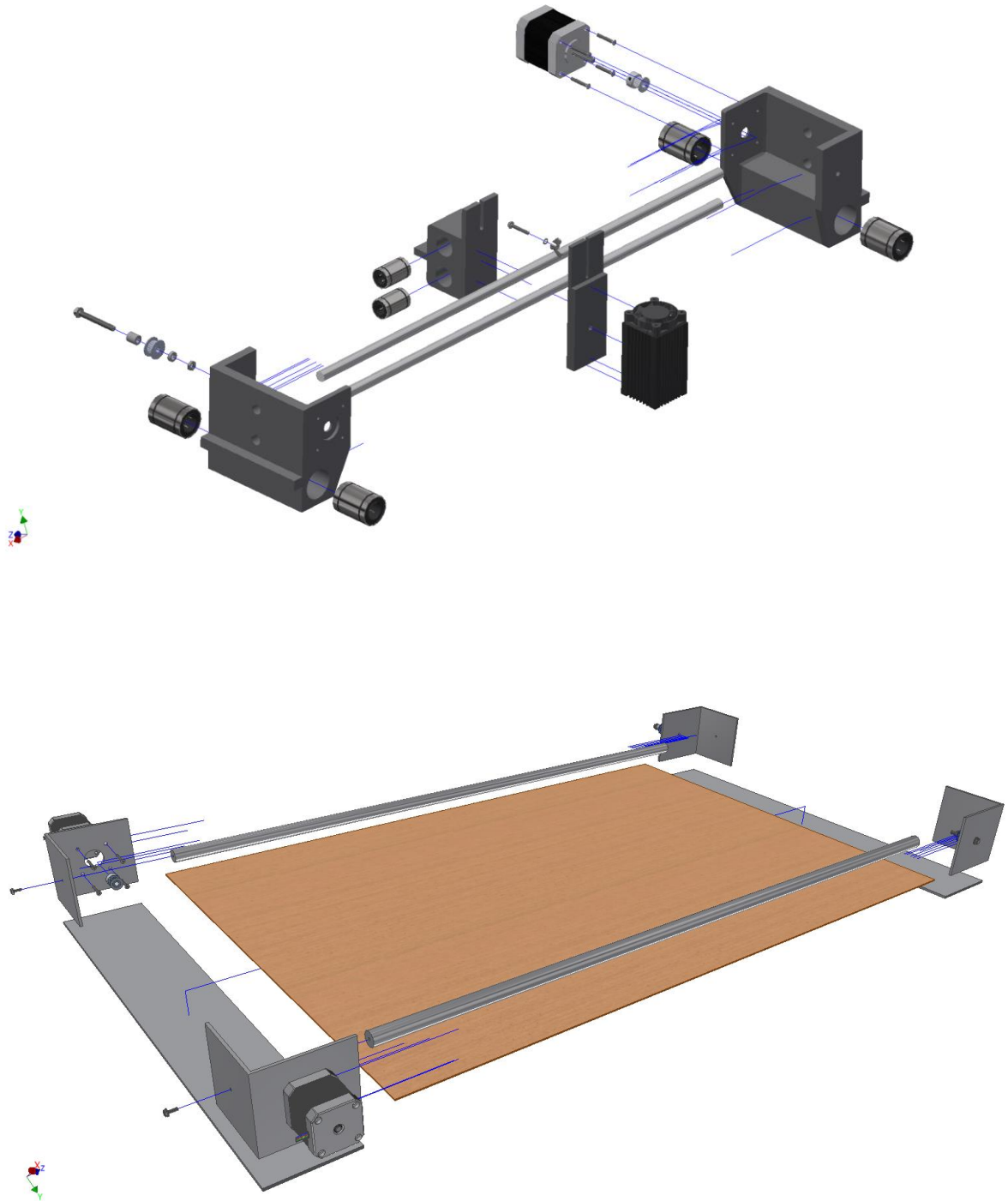
ANEXO I – PLANTAS TÉCNICAS

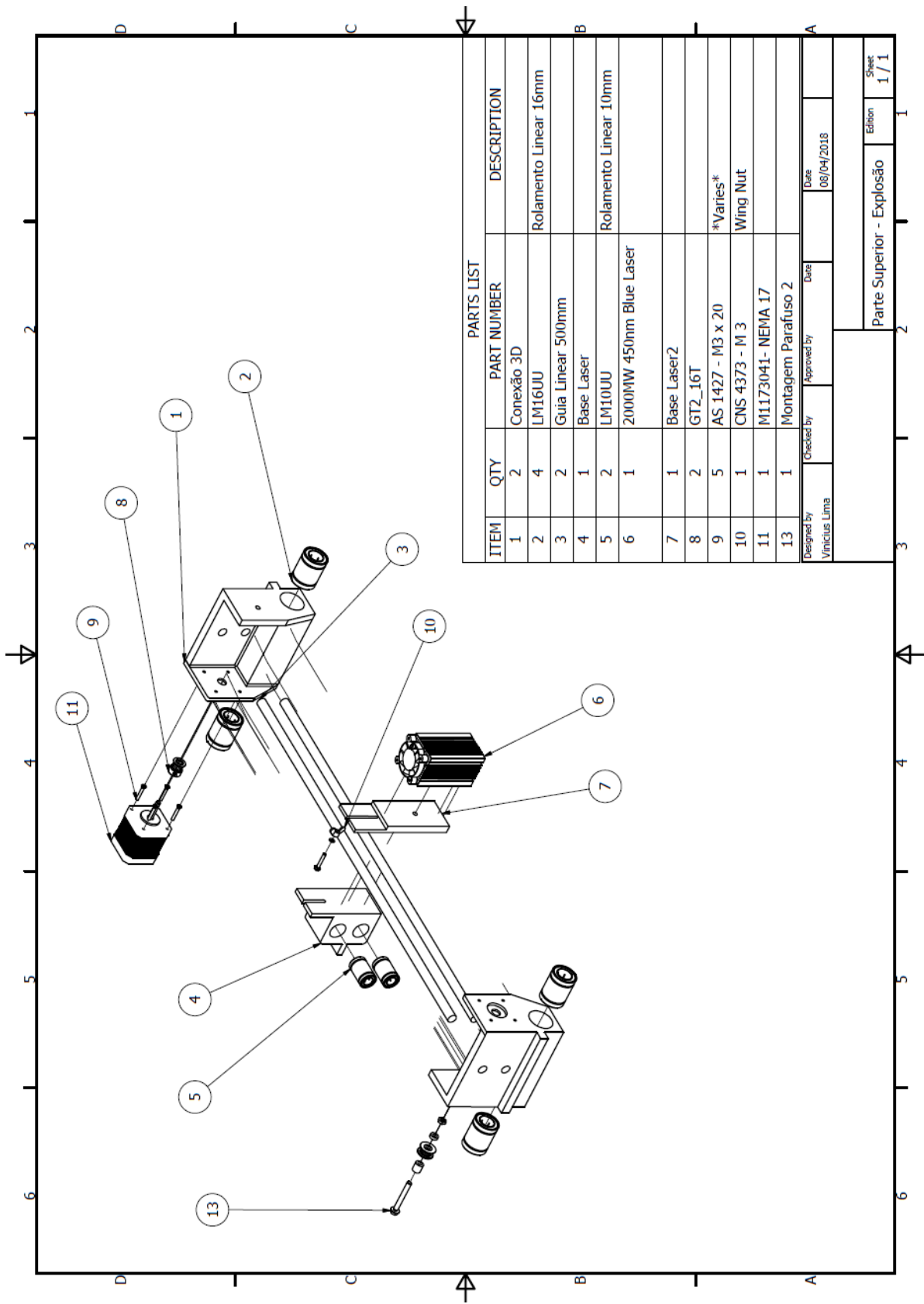


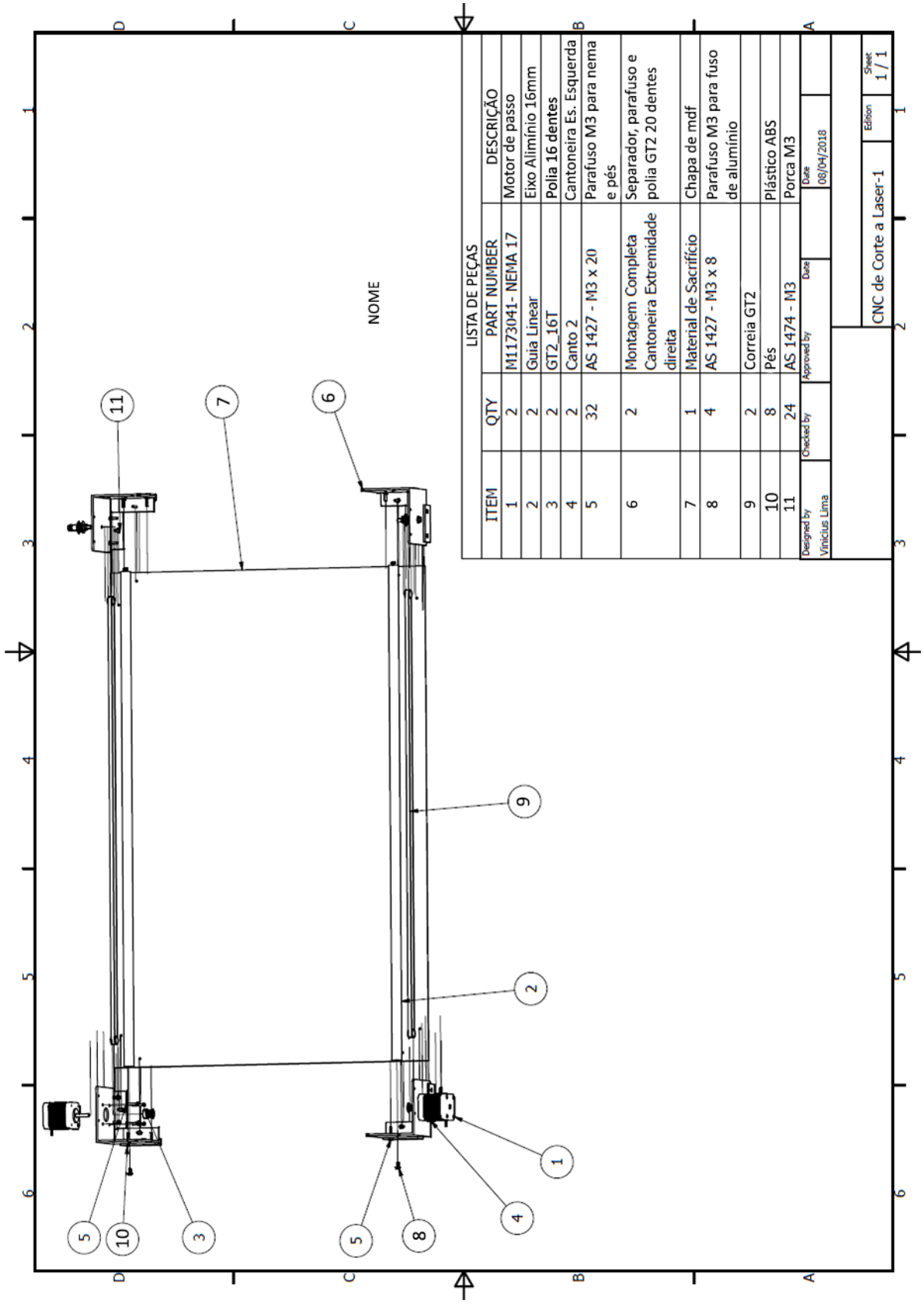




ANEXO II – VISTAS E LISTA DE PEÇAS







LISTA DE PEÇAS			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIÇÃO
1	2	M1173041- NEMA 17	Motor de passo
2	2	Guia Linear	Eixo Alúminio 16mm
3	2	GT2_16T	Polia 16 dentes
4	2	Canto 2	Cantoneira Es. Esquerda
5	32	AS 1427 - M3 x 20	Parafuso M3 para nema e pés
6	2	Montagem Completa Cantoneira Extremidade direita	Separador, parafuso e polia GT2 20 dentes
7	1	Material de Sacrificio	Chapa de mdf
8	4	AS 1427 - M3 x 8	Parafuso M3 para fuso de alumínio
9	2	Correia GT2	
10	8	Pés	Plástico ABS
11	24	AS 1474 - M3	Porca M3
Designed by Vinicius Lima		Approved by	Date 08/04/2018
		CNC de Corte a Laser-1	
		Edition	Sheet 1 / 1