

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
ENGENHARIA MECATRÔNICA**

Nina Cervilha Oliveira

**ADAPTAÇÃO DE ROBÔ CARTESIANO PARA MÁQUINA
DE CORTE A LASER**

**Uberlândia
2020**

Nina Cervilha Oliveira

ADAPTAÇÃO DE ROBÔ CARTESIANO PARA MÁQUINA DE CORTE A LASER

**Trabalho de Conclusão de Curso sub-
metido à Universidade Federal de
Uberlândia, como requisito necessário
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecatrônica**

Uberlândia, março de 2020

Agradecimentos

À esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram o aprendizado do ensino superior, confiança no mérito e ética.

Ao Prof. Dr. Jean-Paul pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

Ao Me. Hiroshi, pelo suporte, por suas correções e incentivos.

À todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

Resumo

Os projetos são desenvolvidos para atender necessidades atuais, no entanto as tendências e tecnologias estão sempre crescendo e inovando. Diante disso, surge a necessidade de atualização de projetos antigos. Esse trabalho tem o objetivo de fazer o *retrofit* de um robô cartesiano, máquina caracterizada pela movimentação linear nos três eixos cartesianos e amplamente utilizada em equipamentos de corte, como CNC, e de movimentação de peças de forma a incluir um sistema de corte a laser. O desenvolvimento desse projeto passa pela análise de requisitos para corte a laser, a manutenção do robô cartesiano incapaz de operar por possuir uma estrutura desgastada com o tempo e com peças quebradas, o reprojeto de peças não adequadas por meio de estudo sobre impressão 3D e alteração dos locais de fixação, remanufatura das peças a serem substituídas e das peças alteradas, montagem e testes.

Palavras-chave: Robô Cartesiano, Corte a Laser, Otimização, *Retrofit*.

Abstract

Projects are developed to satisfy current needs, but trends and technologies are always growing and innovating. Therefore, there is a need to update old projects. This work aims to retrofit a Cartesian robot, a machine characterized by linear movement in the three Cartesian axes and widely used in cutting equipment, such as CNC, and to move parts, in order to include a laser cutting system. The development of this project involves the analysis of requirements for laser cutting, the maintenance of the Cartesian robot unable to operate because it has a structure that has been worn over time and broken parts, the redesign of unsuitable parts using a study on 3D printing and changing some fixation locations, remanufacturing of parts to be replaced and changed parts, assembly and testing.

Keywords: Cartesian Robot, Laser Cut, Optimization, Retrofit.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Eixos de um robô cartesiano	17
Figura 2 – Área de trabalho do robô	17
Figura 3 – Guia trapezoidal com patins	18
Figura 4 – Guia prismática de gaiola de agulha e patins	18
Figura 5 – Eixo com rolamento linear	19
Figura 6 – Eixo com rolamento linear aberto	19
Figura 7 – Trilho e rolamento em V	19
Figura 8 – Sistema com bucha	20
Figura 9 – Rolamento de esferas radiais	20
Figura 10 – Sistema com polias e correias	21
Figura 11 – Rolamento de polias e cabos	21
Figura 12 – Sistema de coroa e corrente	21
Figura 13 – Sistema pinhão e cremalheira	22
Figura 14 – Fuso de esferas recirculantes	22
Figura 15 – Fuso trapezoidal e castanha	22
Figura 16 – Barra roscada e porca	23
Figura 17 – Sistema motor de passo	24
Figura 18 – Exemplo de modelo de driver de motor DC	25
Figura 19 – Exemplo de modelo de driver de motor de passo	25
Figura 20 – Placas Arduino Mega e Ramps 1.4	26
Figura 21 – Sistema de corte a laser	27
Figura 22 – Componentes de uma máquina de corte a laser	27
Figura 23 – Tubo para fluxo de água para resfriamento	29
Figura 24 – Impressão 3D FDM	30
Figura 25 – Resistência da peça impressa	31
Figura 26 – Projeto do robô cartesiano utilizado	32
Figura 27 – Imagem do robô cartesiano base do projeto	33
Figura 28 – Componentes adquiridos	33
Figura 29 – Motor NEMA 17	34
Figura 30 – Sensor fim de curso	34
Figura 31 – Sistema de movimentação eixo X e Y	34
Figura 32 – Sistema de movimentação eixo Z	35
Figura 33 – Sistema de transmissão eixo X e Y	35
Figura 34 – Componentes fabricados	35
Figura 35 – Carro terminal	36
Figura 36 – Peça do motor do carro Z sem modificação	36

Figura 37 – Peça do motor do carro Z com modificação	37
Figura 38 – Montagem da peça do motor do carro Z sem modificação	37
Figura 39 – Montagem da peça do motor do carro Z com modificação	37
Figura 40 – Peça do eixo do carro Z sem modificação	38
Figura 41 – Peça do eixo do carro Z com modificação	38
Figura 42 – Montagem da peça do eixo do carro Z sem modificação	38
Figura 43 – Montagem da peça do eixo do carro Z com modificação	39
Figura 44 – Peça com sentido de impressão modificado	39
Figura 45 – Robô modificado com adição de barra roscada	40
Figura 46 – Estrutura CNC com a barra suporte de cabo alterada	40
Figura 47 – Disposição de jumper para ajuste de passo do eixo X	41
Figura 48 – Interface do software utilizado	43
Figura 49 – Tubo laser de 100W	44
Figura 50 – Disposição de tubo laser	44
Figura 51 – Espelho Molibdênio para máquina de corte a laser	45
Figura 52 – Chiller Modelo CW-5200	46
Figura 53 – Disposição dos espelhos no sistema	47
Figura 54 – Peça desenvolvida para fixação no elemento terminal	47
Figura 55 – Espelho Molibdênio para máquina de corte a laser	47
Figura 56 – Lente de foco para máquina de corte a laser	48
Figura 57 – Sistema montado após retrofit	50
Figura 58 – Sistema de movimentação	51
Figura 59 – Movimentação de teste - Universal G-code Sender	51
Figura 60 – Movimentação de teste	51
Figura 61 – Movimentação do sistema completo	52
Figura 62 – Instalação fim de curso eixo X	52
Figura 63 – Instalação fim de curso eixo Y	53
Figura 64 – Instalação fim de curso eixo Z	53
Figura 65 – Ligação elétrica dos fim de cursos	54
Figura 66 – Ponteira de teste fina	54
Figura 67 – Ponteira de teste grossa	55
Figura 68 – Teste de escala com triângulo equilátero	55
Figura 69 – Teste de escala eixo X	56
Figura 70 – Teste de escala eixo Y	56
Figura 71 – Tela do Maker Cam com o posicionamento do desenho da circunferência	56
Figura 72 – Tela do Universal G-code Sender com o posicionamento e medidas do desenho da circunferência	57
Figura 73 – Resultado desenho da circunferência utilizando o robô cartesiano modi- ficado	57

Figura 74 – Listagem dos materiais necessários para a construção do robô cartesiano existente	64
Figura 75 – Listagem das peças a serem impressas em ABS para robô cartesiano . .	65
Figura 76 – Peça base tubo laser	68
Figura 77 – Peça topo tubo laser	68
Figura 78 – Peça espelho ponto 1	69
Figura 79 – Peça espelho ponto 2	69
Figura 80 – Elemento terminal	70

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Tabela do posicionamento de jumper para ajuste de passo - driver A4988	41
Tabela 2	–	Parâmetros de configuração do GRBL	42
Tabela 3	–	Tabela das peças do sistema laser	48
Tabela 4	–	Tabela das peças do sistema laser	49

Lista de abreviaturas e siglas

MAPL	Laboratório de Planejamento Automático de Manufatura
RP	Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)
3D	3 Dimensões
CAD	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CNC	Controle Numérico Computacional (<i>Computer Numeric Control</i>)
MDF	Painel de fibras de densidade média (<i>Medium Density Fiberboard</i>)
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoroetileno
PC	Policarbonato
GDL	Graus De Liberdade
FDM	Modelagem por Deposição de Fusão (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.2	Justificativa	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Robô Cartesiano	16
2.1.1	Características	16
2.1.2	Sistema de movimentação	17
2.1.3	Sistemas de tração	20
2.2	Motor de passo	24
2.2.1	Driver de motor	24
2.3	Placa de controle	25
2.4	Código G	26
2.5	Sistema Laser	26
2.5.1	Corte a laser	26
2.5.2	Sistema de corte a laser	27
2.5.3	Componentes da máquina	27
2.5.4	Tipos de laser	28
2.5.5	Sistema de resfriamento	28
2.6	Impressão 3D	29
3	DESENVOLVIMENTO	32
3.1	Estudo do robô cartesiano utilizado	32
3.2	Manutenção e melhorias	36
3.3	Conexões na placa controladora	40
3.4	Software utilizado	41
3.5	Projeto de máquina a laser	43
3.5.1	Tubo Laser	43
3.5.2	Fonte Laser	44
3.5.3	Sistema de resfriamento	45
3.5.4	Espelhos e Lente	46
3.5.5	Custo estimado	48
3.6	Projeto mecânico	48

4	RESULTADOS	50
4.1	Testes	50
4.1.1	Testes estruturais	50
4.1.2	Testes no sistema de movimentação	50
4.1.3	Teste do conjunto otimizado	52
4.1.4	Teste dos fim de cursos	52
4.1.5	Ponteira de teste	54
4.1.6	Teste de escala	55
4.1.7	Teste de execução de código G	56
5	CONCLUSÃO	58
6	PROJETOS FUTUROS	59
7	REFERÊNCIAS	60
	ANEXOS	62
	ANEXO A – VERSÕES DOS SOFTWARES UTILIZADOS	63
	ANEXO B – PEÇAS DO ROBÔ CARTESIANO EXISTENTE	64
	APÊNDICES	66
	APÊNDICE A – COMPONENTES DO SISTEMA DE CORTE A LA- SER SUGERIDOS PARA AQUISIÇÃO	67
	APÊNDICE B – PEÇAS PROJETADAS PARA SISTEMA DE CORTE A LASER	68

1 Introdução

A implementação de robôs nas linhas de montagem aumentou a quantidade dessas máquinas no mundo todo (JM Rosario, 2012). Um modelo de robô bastante utilizado até os dias atuais é o robô cartesiano, o qual também é nomeado robô linear. Essa máquina é caracterizada por permitir apenas o deslocamento linear do elemento terminal.

Esse tipo de configuração de maquinário é muito utilizado em prototipagem rápida (RP, de *Rapid Prototyping*). A produção de um protótipo do produto é essencial para verificação e possivelmente correção de sua forma e funcionalidade. A RP pode ser definida como um processo de fabricação através da adição de material em forma de camadas planas sucessivas, isto é, baseado no princípio da manufatura por camada. Esta tecnologia permite fabricar componentes (protótipos, modelos, etc.) físicos em 3 dimensões (3D), com informações obtidas diretamente do modelo geométrico gerado no sistema CAD (*Computer Aided Design*), de forma rápida, automatizada e totalmente flexível.

Implementações práticas da fabricação por camadas para as necessidades atuais de manufatura tornaram-se possíveis devido a integração de processos tradicionais como a metalurgia do pó, extrusão, solda e usinagem CNC, a diversas outras tecnologias acessórias mais recentes, tais como controles de movimento de alta precisão, novos materiais, sistemas de impressão a jato de tinta, tecnologias laser, entre outras. Tal interação é a base dos diversos sistemas de RP atualmente disponíveis no mercado.

Na prototipagem com laser é desnecessário a fabricação de ferramental. O corte a laser reproduz fielmente os arquivos com precisão de centésimos de milímetros e faz bordas de corte com qualidade. O corte e gravação a laser permite a fabricação em diversos materiais como Acrílico, MDF, PE, PP, PTFE, PC, entre outros, de variadas espessuras. Além de gravar sobre todos os tipos de materiais, desde polímeros até metais como aço inox, cerâmicas, vidros e cristais. Devido a essa flexibilidade, o corte a laser é largamente utilizado para prototipagem rápida de peças dos setores como os de equipamentos, indústria naval, do petróleo e automobilística.

É nesse contexto que entra o trabalho atual, visando uma melhor performance de robô cartesiano didático que foi desenvolvido por Rodrigues (2017), através de um retrofit mecânico para suportar um sistema de corte laser.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

Projetar a adaptação de um robô cartesiano existente para um sistema de corte laser.

1.1.2 Objetivos Específicos

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudar e analisar a estrutura atual do robô cartesiano existente, componentes e parâmetros utilizados;
- Estudar sobre o uso de laser para corte;
- Projetar as peças para adaptação do sistema;
- Fabricar as peças e montar o robô.

1.2 Justificativa

O trabalho trata do projeto de um sistema de corte a laser utilizando a estrutura de um robô cartesiano em todas as etapas que um projeto envolve, desde o estudo de tecnologias já existentes, especificação dos materiais a serem utilizados, projeto de fabricação e disposição das peças a serem acrescentadas na estrutura e também a otimização e manutenção do robô.

A formação do profissional de engenharia, nos ramos de automação e da mecânica, não pôde deixar de lado esta realidade. Isso trouxe a necessidade de robôs nas salas de aula para seu estudo. No entanto os robôs comerciais são ainda muito caros quando para fins que não sejam de produção, e normalmente possuem arquitetura e sistemas fechados com o objetivo de proteção de propriedade intelectual, assim surgiram os projetos de robôs manipuladores didáticos como alternativas para integração dessa tecnologia nas universidades.

Além disso, é um trabalho multidisciplinar, abordando as disciplinas-chave do curso de engenharia mecatrônica, sendo nas áreas da mecânica, elétrica e computação.

É um projeto que permite o desenvolvimento do aluno, proporcionando conhecimento na descoberta, criação e junção de tecnologias de maneira funcional e com um propósito, o que considero importante para a experiência de um engenheiro mecatrônico.

O presente trabalho também se justifica pela necessidade de outros alunos de uma máquina multifuncional em que possam dar continuidade às suas pesquisas de mestrado e doutorado, envolvendo robótica, corte a laser e otimização, além de outros posteriormente apresentados.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Robô Cartesiano

Um robô cartesiano é uma máquina cujos três principais eixos de controle são lineares e perpendiculares entre si.

A localização da garra é feita em relação as coordenadas X, Y e Z configurado como referência.

Essa configuração estrutural é utilizada em equipamentos de diversas áreas trazendo segurança e qualidade. Cada eixo pode ser entendido como uma junta prismática, e portanto esses robôs são do tipo PPP pela classificação da robótica.(VMF Santos, 2004)

Normalmente o controle desse tipo de robô é simples, uma vez que a movimentação em cada eixo representa uma relação direta no movimento do elemento terminal do robô. Sendo assim, torna-se dispensável a modelagem cinemática da máquina, o que diminui a complexidade de sua programação.

2.1.1 Características

Os robôs são caracterizados pela área de trabalho, graus de liberdade, geometria e estrutura mecânica.

A área de trabalho é definida por a área total percorrida pelo órgão terminal ou dadas todas as possibilidades de execução de movimento do robô. No caso do robô cartesiano a área é relativamente pequena por não conseguir atingir regiões sob objetos.

Os graus de liberdade são definidos pelo número de juntas, em uma cadeia cinemática aberta, o mais comum na robótica são seis GDL (graus de liberdade), sendo três de rotação e três de translação, mas o robô cartesiano apenas possui as juntas de translação. Ou seja, ele possui três GDL, conforme mostram as Figuras 1 e 2. A geometria do robô cartesiano é PPP, ou seja, três juntas prismáticas. A estrutura do robô é caracterizada por elevado grau de rigidez, confiável exatidão na localização do elemento terminal e simples controle (L Missiaggia, 2014).

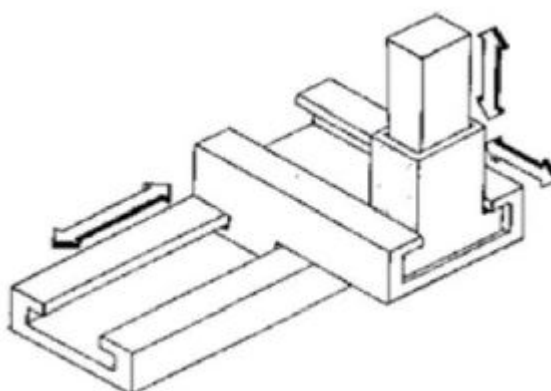


Figura 1 – Eixos de um robô cartesiano

Fonte: Rodrigues (2017)

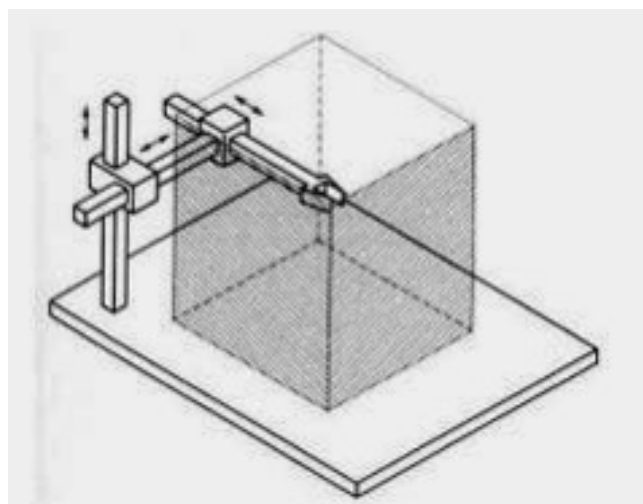


Figura 2 – Área de trabalho do robô

Fonte: Controle e Automação Industrial III

2.1.2 Sistema de movimentação

Para a fundamentação deste subtópico foi usada a referência (Rodrigues, 2017).

Diversos sistemas de movimentação são utilizados em robôs cartesianos, os mais

comuns são: guias trapezoidais com patins, guia prismática de gaiola de agulha, eixos com rolamentos lineares, eixo com rolamentos lineares aberto, trilhos e rolamentos em V, sistema com bucha e rolamentos de esferas radiais.

As guias trapezoidais com patins (Figura 3) possuem baixo desvio dimensional micrométrico, pouca resistência ao deslizamento e alta capacidade de carga. As guias são atreladas a patins com esferas recirculantes.



Figura 3 – Guia trapezoidal com patins

Fonte: Rodrigues (2017)

A guia prismática de gaiola de agulha e patins (Figura 4) possui boa precisão e capacidade de carga. É composto por um trilho e um carro, também nomeados de guia e gaiola.



Figura 4 – Guia prismática de gaiola de agulha e patins

Fonte: Rodrigues (2017)

Os eixos com rolamentos lineares (Figura 5) são acoplados por esferas recirculantes, possuem limitada capacidade de carga, boa precisão e custo intermediário.

O eixo com rolamentos lineares aberto (Figura 6) é semelhante aos eixos cilíndricos com rolamentos lineares fechado. Esse sistema se diferencia no conjunto em que o rolamento é aberto, e o eixo é apoiado por toda sua extensão, melhorando a fixação e aumentando a capacidade de carga do conjunto.



Figura 5 – Eixo com rolamento linear

Fonte:OBR



Figura 6 – Eixo com rolamento linear aberto

Fonte: Rodrigues (2017)

Os trilhos e rolamentos em V (Figura 7) não apresentam grande capacidade de carga se comparado aos apresentados anteriormente, mas oferecem resultados ótimos em questão de precisão de encaixe e possuem custo intermediário.

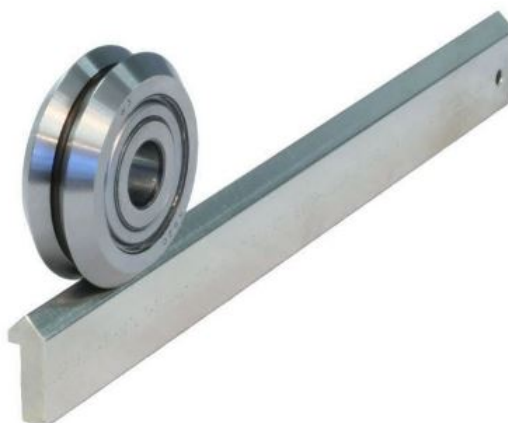


Figura 7 – Trilho e rolamento em V

Fonte:Direct Industry

O sistema com bucha (Figura 8) funciona sem rolamentos, na base do atrito direto entre bucha e eixo. Por isso, a bucha deve ser de material menos duro que o eixo e trocada

de tempos em tempos. Esse sistema possui menor custo.



Figura 8 – Sistema com bucha

Fonte: Rodrigues (2017)

Os rolamentos de esferas radiais (Figura 9) possuem os trilhos por onde irão correr, além de se definir seus eixos de giro e como prendê-los ao corpo da estrutura.



Figura 9 – Rolamento de esferas radiais

Fonte: Loja BRAFER

2.1.3 Sistemas de tração

Para a fundamentação deste subtópico foi usada a referência (Rodrigues, 2017).

A estrutura do robô cartesiano permite o uso de diversos sistemas de tração, entre os mais comuns estão: polias e correias, polias e cabo de aço, coroa e corrente, pinhão e cremalheira, fuso de esferas recirculantes, fuso trapezoidal e castanha, barra roscada e porca.

O sistema utilizando polias e correias (Figura 10) apresenta boa durabilidade, baixo custo, boa capacidade de carga, baixa folga, baixa perda por atrito, maiores velocidades de movimento e alta vida útil.

As polias e cabos de aço (Figura 11) são semelhantes a correias, com a diferença de que as polias são lisas e devem ter diâmetro maior, pois os cabos de aço apresentam menor flexibilidade. Esse é um sistema indicado para quando se necessita de maiores capacidades de tração nos eixos das máquinas, e portanto é utilizado em máquinas de maior porte e que executam trabalhos mais pesados.



Figura 10 – Sistema com polias e correias

Fonte: CHM Redutores)

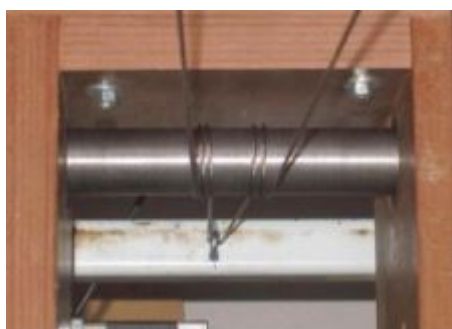


Figura 11 – Rolamento de polias e cabos

Fonte: Rodrigues (2017)

A coroa e corrente (Figura 12) é utilizada quando se necessita de alta capacidade de transmissão de potência com baixas perdas, e não se requisita boa precisão na movimentação. Também é necessária a fabricação de coroas menores para serem acopladas aos motores, e essas não são encontradas a pronta venda no mercado, sendo portanto necessária a produção sob encomenda, encarecendo o sistema.



Figura 12 – Sistema de coroa e corrente

Fonte: Rodrigues (2017)

O pinhão e cremalheira (Figura 13) é um sistema relativamente caro e de difícil manutenção no caso de ser necessário uma reposição, tanto pelo posicionamento e alinhamento dos componentes, quanto pelo preço de substituição. Por outro lado, assim

como corrente e coroa, é um sistema de alta eficiência na transmissão de potência, sendo indicado para quando se necessita grandes capacidades de tração no eixo da máquina.



Figura 13 – Sistema pinhão e cremalheira

Fonte: Rodrigues (2017)

O fuso de esferas recirculantes (Figura 14) apresenta baixíssima folga e alta precisão na movimentação, além de baixo atrito entre componentes. Entretanto são os mais caros dentre os aqui citados para o sistema de tração.



Figura 14 – Fuso de esferas recirculantes

Soluções Industriais

O fuso trapezoidal e castanha (Figura 15) é uma alternativa mais barata ao tracionamento de máquinas CNC. Apresenta bons resultados a baixo custo, mas exige maior frequência de manutenção.



Figura 15 – Fuso trapezoidal e castanha

Fonte: Voltriz

A barra roscada e porca (Figura 16) não é desenvolvido para o fim de transmissão de movimento, apenas para fixação de partes móveis. Porém, há casos onde se utilizam esses componentes como um conjunto rosca sem fim, para gerar movimento linear a partir de movimento circular. Esse sistema apresenta alto atrito e perda mecânica, e por isso é indicado apenas para movimentações mais lentas ou que envolvem menores esforços. Por outro lado, a barra roscada funciona como uma rosca sem fim que gera redução mecânica do movimento, aumentando a força e a resolução do movimento.



Figura 16 – Barra roscada e porca

Fonte: ITC TERM

2.2 Motor de passo

Em máquinas cartesianas, ou lineares, os motores são utilizados com a finalidade de transformar energia elétrica em movimento linear dos eixos. Os motores escolhidos são sempre elétricos para melhor refinamento do controle.

Os motores mais comuns de serem usados são os motores de passo. O motor de passo é um dispositivo eletromecânico que converte pulso elétrico em movimento mecânico que gera variação angulares discreta. O rotor ou eixo de um motor de passo é rotacionado em pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, quando pulsos elétricos são aplicados em uma determinada sequência nos terminais deste (Rodrigues, 2017).

No seu interior há estatores formados por bobinas que geram, quando percorridos por uma corrente elétrica, o campo magnético necessário para o movimento do rotor, que é construído com ímãs permanentes confeccionados de acordo com o número de passos. Essa rotação é controlada por meio de um circuito externo que promove a oscilação do sinal que percorrerá os pares de estatores e, por isso, não pode ser conectado diretamente à alimentação, pois desse modo não haveria a pulsação necessária para que o motor pudesse girar, como mostra a Figura 17 (Rodrigues, 2017).

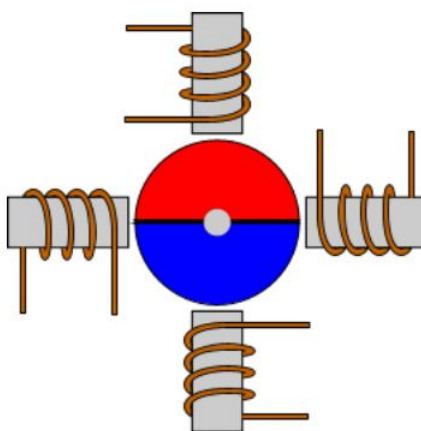


Figura 17 – Sistema motor de passo

Fonte: Athos Electronics

2.2.1 Driver de motor

Os drivers de motor (Figuras 18 e 19) controlam a alimentação dos motores, enviando a corrente elétrica de magnitude e sentido específico aos terminais corretos, coordenando assim a movimentação do motor. Os drivers recebem os comandos pela placa de controle da máquina, estabelecem a forma de acionamento dos motores em relação aos passos (diferentes resoluções) e usualmente são montados anexos à mesma. (Rodrigues, 2017)

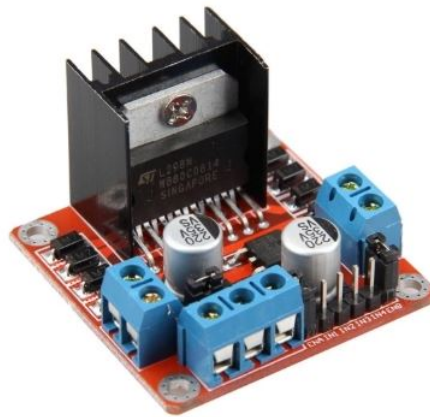


Figura 18 – Exemplo de modelo de driver de motor DC

Fonte: Rodrigues (2017)



Figura 19 – Exemplo de modelo de driver de motor de passo

Fonte: Rodrigues (2017)

2.3 Placa de controle

A placa de controle, sempre presente em robôs cartesianos, é um sistema embarcado dedicado, é um hardware interno à máquina e geralmente anexo à mesma. (Rodrigues, 2017) A finalidade é receber de um computador central o código G a ser executado, interpretar o mesmo em coordenadas e controlar os motores, com o intermédio dos drivers de acionamento para executar a movimentação necessária.

A placa de controle é (Figura 20) microprocessada e executa o firmware de controle da máquina e o software programado.

Software e firmware são as partes de comunicação com uma máquina em forma de código de programação. O software é executado no computador central da máquina, enquanto o firmware é um software secundário executado na placa de controle da máquina.

Há várias opções de firmwares de controle open-source. Entre os mais famosos destacam-se Marlin e Grbl, ambos compatíveis com a placa de controle mais comumente utilizada em máquinas não projetadas industrialmente: o conjunto Arduino Mega e Ramps 1.4.

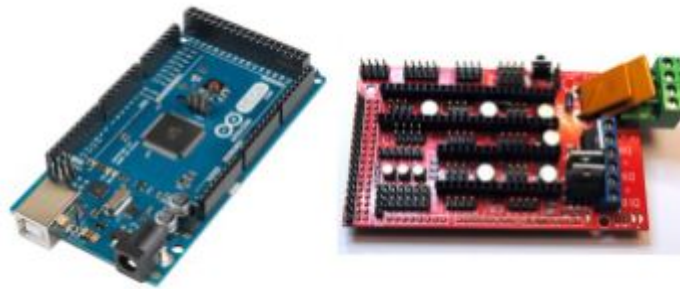


Figura 20 – Placas Arduino Mega e Ramps 1.4

Fonte: Rodrigues (2017)

O software utilizado visa enviar e interpretar o código G, linguagem de máquina. Entre os mais utilizados estão: Universal G Code Sender e bCNC.

2.4 Código G

Para a fundamentação deste subtópico foi usada a referência (Quemel e Santana, 2007).

O código G é uma linguagem de programação criada com o intuito de ser uma linguagem de alto nível, simples e com ênfase na codificação de movimentos em máquinas de comando numérico.

A sua função principal é ditar os movimentos no espaço, porém o código G também codifica instruções como velocidade do movimento, setup de parâmetros de trabalho, como velocidade de corte, avanço, tipo de ferramenta, interpolação de pontos, tipo de unidade de medida, referenciamento de coordenadas, sentido de rotação da fresa, entre outros.

O código G é criado e enviado por computador para que a peça possa ser produzida na máquina, após transferência do código para a placa de controle. O processo de produção de uma peça mecânica numa máquina de controle numérico é o desenho da peça em um programa CAD, um software gera o código G necessário a partir da peça, o mesmo é transferido para a placa de controle, que o executa.

2.5 Sistema Laser

2.5.1 Corte a laser

As máquinas de corte a laser se diferenciam dos outros tipos de sistemas de corte em vários aspectos, pois, além de realizar o corte em qualquer material, como a máquina por corte via jato de água, o corte a laser tem o custo mais reduzido, uma maior praticidade e máquinas de tamanhos reduzidos, dependendo da utilização.

2.5.2 Sistema de corte a laser

O sistema de corte a laser é composto por tubo laser, fonte laser, espelhos e bocal (Dias, 2015).

O tubo de laser energizado pela fonte laser emite o laser que é direcionado para o local de corte por meio de espelhos e efetua o corte com o auxílio da lente que focaliza o feixe, como demonstrado na Figura 21.

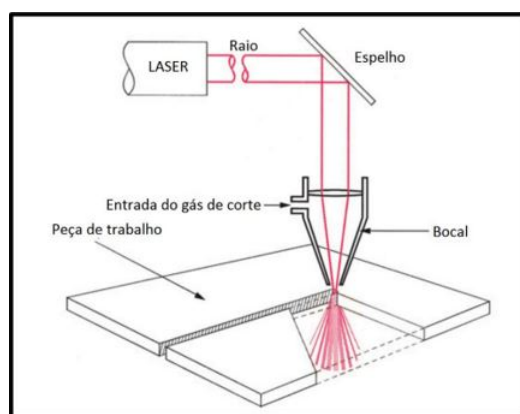


Figura 21 – Sistema de corte a laser

Fonte: Dias (2015)

2.5.3 Componentes da máquina

A estrutura da máquina de corte a laser possui os seguintes componentes: dispositivo laser, fonte laser, espelhos, lente, mesa de apoio, sistema de refrigeração, extrator e gases de corte, sendo os dois últimos opcionais de acordo com a necessidade da peça para corte (Figura 22) (Dias, 2015).

O sistema de refrigeração é pensado e projetado de acordo com a necessidade de cada equipamento.

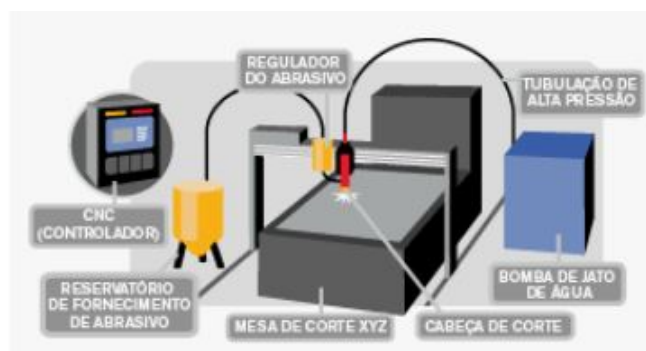


Figura 22 – Componentes de uma máquina de corte a laser

Fonte: Hyperterm

2.5.4 Tipos de laser

O raio laser emitido pelo tubo laser pode ter diferentes composições e, consequentemente, características e aplicações variadas. Os tipos mais comuns são: laser CO₂, laser de fibra e laser de cristal (Dias, 2015).

- **Laser Co₂:** é um laser de gás, baseado em uma mistura gasosa de dióxido de carbono, o qual é estimulado eletricamente. Possui o comprimento de onda de 10600 nm, é adequado para trabalhar em materiais não metálicos e na maior parte dos plásticos. Esse tipo possui uma eficiência relativamente alta e uma boa qualidade do feixe. Ele é o tipo de laser mais utilizados atualmente. O laser de CO₂ é adequado para o corte dos seguintes materiais: madeira, acrílico, vidro e plásticos.
- **Laser de fibra:** pertence ao grupo de laser de estado sólido. E possui como meio ativo uma fibra de Sílica dopada com íterbio. Possui comprimento de onda de 1064 nm. O laser de fibra produz um diâmetro focal extremamente pequeno, o que resulta em uma intensidade de até 100 vezes mais do que a intensidade do laser de CO₂ com a mesma potência média emitida. Esse tipo de laser é perfeitamente adaptado para a marcação por meio de tratamento térmico de metais, para gravação em metal, e em alto contraste de marcações plásticas. Os lasers de fibra possuem uma baixíssima taxa de manutenção e apresentam uma vida útil maior que os demais tipos. O laser de fibra é adequado para o corte dos seguintes materiais: metais, metais revestidos, plásticos
- **Laser de cristal (YAG):** Como o laser de fibra, o laser de cristal pertence ao laser de estado sólido. Os tipos de laser mais comuns nesta categoria são Nd: YAG (granada ítrio alumínio dopado com neodímio) e Nd: YVO (dopado com neodímio ítrio orto-vanadato), em homenagem ao neodímio elemento dopante e ao cristal transportador. Possui comprimento de onda de 1064 nm, ou seja, o laser de cristal tem o mesmo comprimento de onda que o laser de fibra e são, portanto, também adequados para a marcação de metais e plásticos. Ao contrário dos lasers de fibra, esse tipo possui uma vida útil baixa e exige mais manutenção. O laser de cristal é adequado para os seguintes materiais: metais, metais revestidos, plásticos e cerâmicos.

2.5.5 Sistema de resfriamento

O tubo LASER é preparado para receber o sistema de resfriamento via fluxo de água, para isso o tubo possui uma entrada e saída de água para esta circule, com o intuito de que o laser não ultrapasse a temperatura ótima de operação (Figura 23) (Dias, 2015).

O fabricante de tubo laser especifica a temperatura ideal. Para manter o tubo nesta faixa térmica, precisa-se de um sistema de resfriamento que retire calor constantemente,



Figura 23 – Tubo para fluxo de água para resfriamento

Fonte: Shoptime

porém não abaixando a temperatura de maneira excessiva pois pode haver condensação dos gases internos ao tubo, prejudicando seu funcionamento e eficácia (Dias, 2015).

2.6 Impressão 3D

Para a fundamentação deste subtópico foi usada a referência (Fortulan, 2017).

É vigente o uso da manufatura aditiva (impressoras 3D) na fabricação direta de produtos comerciais, e isto é devido aos avanços e popularização de programas computacionais de desenho (CAD), bem como das impressoras 3D, em especial nos últimos dez anos.

Várias são as técnicas de adição de material disponíveis na presente tecnologia. O princípio básico de funcionamento de uma impressora 3D parte de um desenho computacional tridimensional que é convertido em elementos triangulares e então dividido em camadas por um software, em seguida a máquina adiciona material camada a camada até formar o produto equivalente ao desenho proposto.

Os dispositivos de Prototipagem Rápida mais comuns e difundidos pelo mundo são os que utilizam a tecnologia Modelagem por Deposição de Material Fundido, conhecida pela sigla em inglês FDM. O processo tipicamente se inicia pela extrusão de filamentos de material, a partir de um cabeçote extrusor, sobre uma plataforma de construção, formando a primeira camada do componente em fabricação. Após esse processo a plataforma é rebaixada na medida da espessura de camada da peça, então é depositada uma nova camada de material que se une com a anterior recém depositada. O procedimento se repete até o fim da construção do produto.

O processo FDM também pode utilizar um material de suporte que é depositado

formando uma estrutura parcialmente aderida à peça, a fim de proporcionar maior apoio, estabilidade e precisão geométrica à construção. Esse material de suporte é retirado mecanicamente ou quimicamente após a fabricação. A ilustração da Figura 24 mostra a fabricação por FDM.

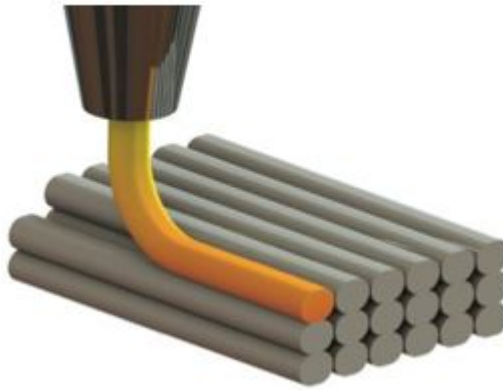


Figura 24 – Impressão 3D FDM

Fonte: Boa Impressão 3D

Na maioria das impressoras 3D comerciais, o usuário não controla a trajetória de deposição do material, porém, o posicionamento da peça na plataforma de impressão pode conferir as características mecânicas desejadas ao produto.

A resistência mecânica à tração e à compressão de corpos manufaturados em impressora 3D com polímero ABS se altera em função das diferentes direções de deposição de filamento, o que pode causar rápida fratura diminuindo o tempo de vida da peça produzida dependendo dos esforços na peça e a direção de impressão.

Em estudos utilizados como referência, os corpos de prova fabricados com filamentos depositados 90° em relação ao sentido do esforço se provaram menos resistentes mecanicamente, já corpos de prova com deposição de filamento a 0° em relação ao sentido do esforço se mostraram os mais resistentes (Figura 25).

É possível verificar também que as peças possuem maior resistência à compressão que à tração. O material tende a falhar pelo descolamento de camadas de impressão quando solicitado em tração.

Outro ponto de atenção é que defeitos aleatórios introduzidos pelo processo de manufatura causam considerável efeito na resistência mecânica de uma peça fabricada por FDM.



Figura 25 – Resistência da peça impressa

Fonte: Boa Impressão 3D

No projeto do item a ser impresso, deve ser levado em consideração os esforços de trabalho em cada direção, e o gerenciamento do efeito anisotrópico da peça pode ser feito com o adequado posicionamento da peça na plataforma de impressão, para o êxito do produto fabricado.

3 Desenvolvimento

O desenvolvimento do projeto foi dividido nas seguintes etapas:

- Estudo do robô cartesiano utilizado como base
- Manutenção do robô cartesiano
- Alterações e melhoras no projeto do robô
- Especificação dos componentes do sistema laser
- Projeto mecânico
- Testes estruturais
- Testes no sistema de movimentação
- Teste do conjunto otimizado

3.1 Estudo do robô cartesiano utilizado

O robô cartesiano utilizado foi desenvolvido seguindo as especificações: prototipagem de peças utilizando impressão 3D, volume de trabalho de 1100x1100x150mm (X-Y-Z), multifuncionalidade e baixo custo.

A definição do sistema de eixo utilizado está descrita nas Figuras 26 e 27.

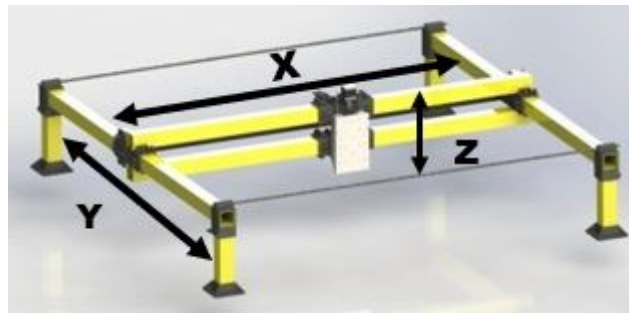


Figura 26 – Projeto do robô cartesiano utilizado

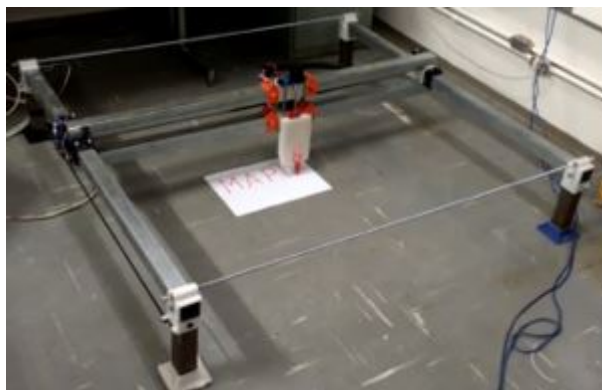


Figura 27 – Imagem do robô cartesiano base do projeto

Fonte: Rodrigues (2017)

Os componentes utilizados no robô cartesiano podem ser divididos em duas categorias: as peças adquiridas e as peças projetadas.

As peças adquiridas foram as seguintes: fonte de alimentação, motores de passo, sensores, sistemas de transmissão, sistemas de movimentação e placa controladora (Figura 28).



Figura 28 – Componentes adquiridos

Fonte: Rodrigues (2017)

A fonte de alimentação utilizada é uma fonte chaveada de 24V 15A.

Os motores de passo utilizados são motores de passo NEMA 17, com as seguintes especificações: corrente 1,7A por fase, quatro fios bipolares, alimentação de 12 a 18V e torque 5KGF*CM (Figura 29).



Figura 29 – Motor NEMA 17

Fonte: Rodrigues (2017)

Os sensores utilizados são três sensores fim de curso com a finalidade de sinalizar o zero da máquina (ponto configurado como referência) (Figura 30).



Figura 30 – Sensor fim de curso

Fonte: Eletronline Shop

Para a movimentação foram utilizados os sistemas eixo rolamento e porca rosca sem fim, sendo o sistema de eixo rolamento nos eixos X e Y (Figura 31) e o sistema porca rosca sem fim no eixo Z. É importante observar que a movimentação do eixo Z também é auxiliada por dois conjunto eixo rolamento (Figura 32).

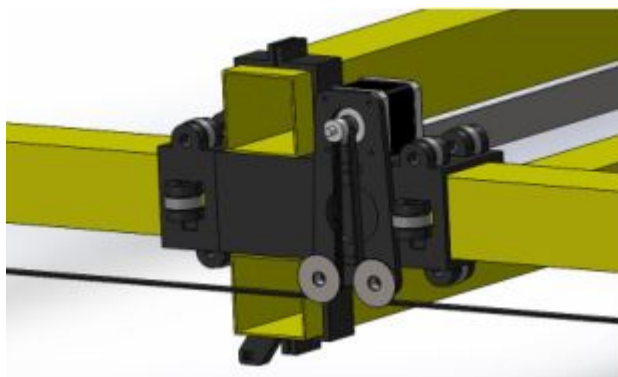


Figura 31 – Sistema de movimentação eixo X e Y

Fonte: Rodrigues (2017)

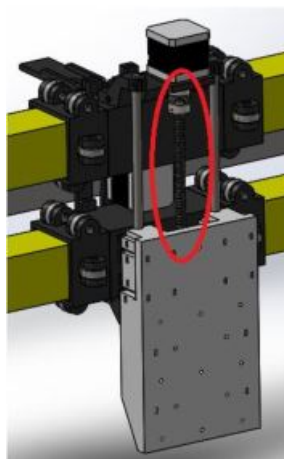


Figura 32 – Sistema de movimentação eixo Z

Fonte: Rodrigues (2017)

Para o sistema de transmissão foi utilizado o sistema de correia polia (Figura 33).

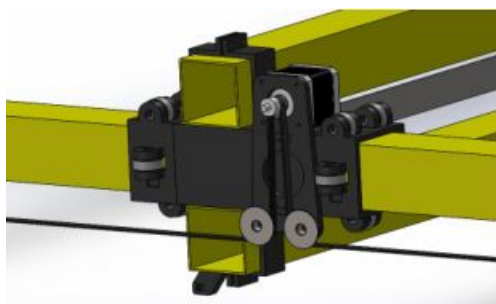


Figura 33 – Sistema de transmissão eixo X e Y

Fonte: Rodrigues (2017)

Os componentes fabricados são os elementos estruturais da máquina e também os componentes que auxiliam os sistemas de movimentação e tracionamento (Figura 34).



Figura 34 – Componentes fabricados

Fonte: Rodrigues (2017)

O carro terminal foi projetado de acordo com o requisito de multifuncionalidade da máquina, o que facilita a adição do sistema laser no equipamento (Figura 35).



Figura 35 – Carro terminal

Fonte: Rodrigues (2017)

3.2 Manutenção e melhorias

Com o intuito de atingir um dos objetivos específicos que seria o funcionamento do robô cartesiano, o primeiro passo foi substituir as peças quebradas. Antes mesmo da fabricação e troca dos componentes se estudou o que poderia ser feito para melhorar o projeto e permitir que a manutenção seja facilitada.

A melhoria do projeto em termos de estrutura visa a otimização da montagem e desmontagem da máquina e também aumentar a durabilidade das peças observando a direção de maior resistência.

Para a otimização da montagem e desmontagem da máquina para manutenção ou melhorias foi trocado o local dos furos da peça do motor do carro Z. A peça sem e com a modificação são apresentadas nas Figuras 36 e 37, respectivamente.

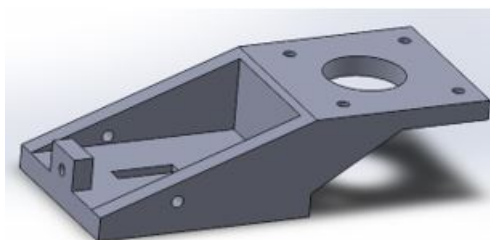


Figura 36 – Peça do motor do carro Z sem modificação

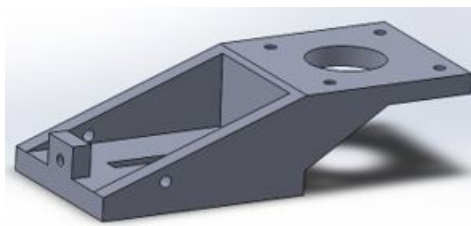


Figura 37 – Peça do motor do carro Z com modificação

A fixação e retirada da peça se tornou mais fácil e rápido acesso com a alteração. Pode - se observar a montagem da peça antes e após a modificação nas Figuras 38 e 39, respectivamente.



Figura 38 – Montagem da peça do motor do carro Z sem modificação

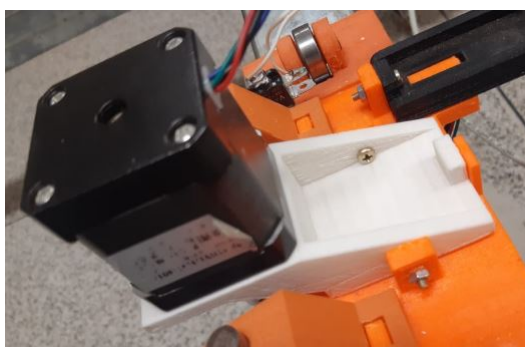


Figura 39 – Montagem da peça do motor do carro Z com modificação

O mesmo foi implantado na peça do eixo do carro Z, porém nessa peça também também foi alterado o mecanismo de fixação do eixo visando melhor qualidade da peça e maior durabilidade. A peça sem e com as alterações é mostrada nas Figuras 40 e 41, respectivamente.

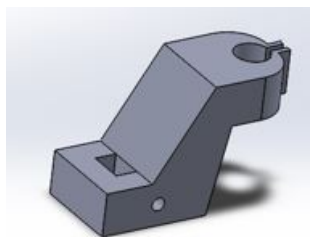


Figura 40 – Peça do eixo do carro Z sem modificação

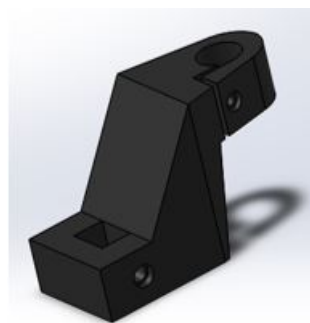


Figura 41 – Peça do eixo do carro Z com modificação

A troca e manutenção da peça se tornou mais simplificada com as alterações. A retirada e a fixação do eixo Z também foi facilitada, o que prolonga a vida útil da peça. O risco de rompimento no sistema que reforça a sustentação do eixo foi reduzido com a troca de mecanismo por conta da retirada das abas com pouca espessura. Observa-se a montagem da peça antes e após a modificação nas Figuras 42 e 43, respectivamente.



Figura 42 – Montagem da peça do eixo do carro Z sem modificação



Figura 43 – Montagem da peça do eixo do carro Z com modificação

Foi identificado com os estudos realizados nas peças fraturadas que as mais afetadas são as que compõem a estrutura base do robô, que permitem a conexão do metalon do pé (base) com o metalon do eixo Y. Dessa forma, foi testado a mudança da direção de impressão da peça (Figura 44) com a finalidade de aumentar a resistência da mesma, já que as peças são mais resistentes quando sofrem esforços contrários ao sentido de formação da camada de impressão.



Figura 44 – Peça com sentido de impressão modificado

Outra alteração realizada foi a adição de mais duas barras roscadas 5/16 pol com comprimento de 150 mm (cada) em paralelo com o eixo X (Figura 39) com o intuito de melhorar a rigidez do sistema.

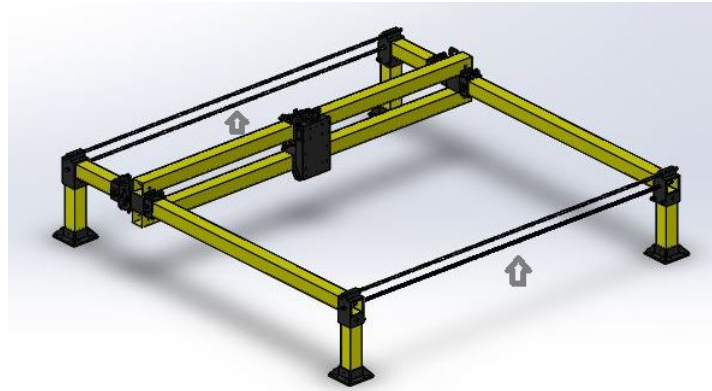


Figura 45 – Robô modificado com adição de barra roscada

O robô cartesiano utilizado como base contém uma estrutura em perfil L usada para apoio do conjunto de cabos do sistema, o material da barra utilizada no sistema existente era Ferro e o esforço nas peças impressas de fixação não era compatível com a resistência das mesmas, o que resultava em um rompimento da aba de fixação do material. Para evitar esse problema, a barra foi alterada com o objetivo de diminuir a força (peso) exercida nas peças impressas, o que diminui os esforços mecânicos no elemento de fixação das mesmas. O material utilizado na atualização é o PVC. O parâmetro de escolha foi o peso específico: Ferro Comum - 7800 kg/m^3 e PVC - 1380 kg/m^3 e também a disponibilidade no mercado de materiais com as dimensões aproximadas do projeto original (Figura 46).



Figura 46 – Estrutura CNC com a barra suporte de cabo alterada

3.3 Conexões na placa controladora

A placa controladora Ramps é responsável por enviar comandos ao robô cartesiano, comandando os motores e recebendo sinal dos fim de cursos. É possível fazer um ajuste de passo de acordo com o posicionamento dos jumpers abaixo dos drivers de motores. A relação está disposta na Tabela 1.

	Jumper MS1	Jumper MS2	Jumper MS3
1 passo	0	0	0
1/2 passo	1	0	0
1/4 de passo	0	1	0
1/8 de passo	1	1	0
1/16 de passo	1	1	1

Tabela 1 – Tabela do posicionamento de jumper para ajuste de passo - driver A4988

Para montagem e controle do sistema, foi escolhido que os motores dos eixos X e Y seriam ajustados com 1/2 passo e o motor do eixo Z com 1/4 de passo. A Figura 47 demonstra a configuração de ajuste do eixo X como exemplo.

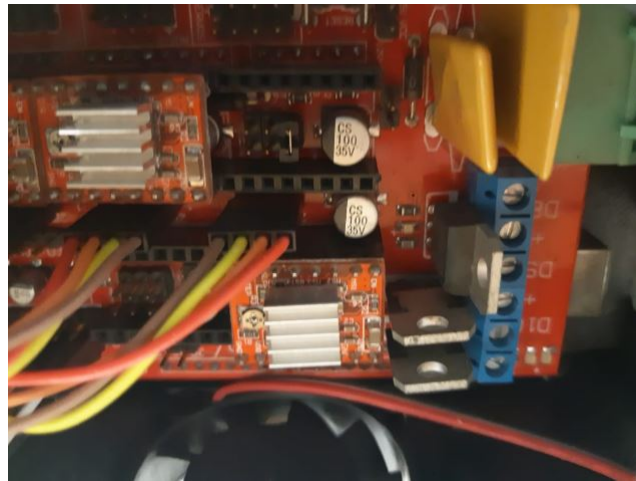


Figura 47 – Disposição de jumper para ajuste de passo do eixo X

3.4 Software utilizado

O software Universal G-code sender (Figura 48) foi escolhido em conjunto com o firmware GRBL, utilizando a placa controladora formada pelo conjunto de placas Arduino Mega e Ramps 1.4.

Esse programa foi definido pela facilidade de aprendizado e pela interface simplificada e intuitiva.

Para a configuração do robô cartesiano utilizando o software, é preciso modificar alguns parâmetros padrão, de acordo com as características da máquina. Esses parâmetros foram encontrados seguindo a referência (Rodríguez, 2017) e também por meio de tentativa e erro para melhores resultados.

Os valores configurados estão apresentados na Tabela 2:

Parâmetro	Valor	Variável
\$0	10	(step pulse, usec)
\$1	255	(step idle delay, msec)
\$2	0	(step port invert mask)
\$3	7	(dir port invert mask)
\$4	0	(step enable invert, bool)
\$5	0	(limit pins invert, bool)
\$6	0	probe pin invert, bool
\$10	3	(status report mask)
\$11	0.020	(junction deviation, mm)
\$12	0.002	(arc tolerance, mm)
\$13	0	(report inches, bool)
\$14	1	(auto start, bool)
\$20	0	(soft limits, bool)
\$21	1	(hard limits, bool)
\$22	1	(homing cycle, bool)
\$23	7	(homing dir invert mask)
\$24	25.000	(homing feed, mm/min)
\$25	500.000	(homing seek, mm/min)
\$26	250	(homing debounce, msec)
\$27	0.000	(homing pull-off, mm)
\$100	12.732	(x, step/mm)
\$101	12.732	(y, step/mm)
\$102	640.000	(z, step/mm)
\$110	2500.000	(x max rate, mm/min)
\$111	2500.000	(y max rate, mm/min)
\$112	500.000	(z max rate, mm/min)
\$120	10.000	(x accel, mm/sec ²)
\$121	10.000	(y accel, mm/sec ²)
\$122	10.000	(z accel, mm/sec ²)
\$130	1300.000	(x max travel, mm)
\$131	1310.000	(y max travel, mm)
\$132	100.000	(z max travel, mm)

Tabela 2 – Parâmetros de configuração do GRBL

A versão utilizada para o software Universal G-code sender foi 2.0 Platform (Beta) e a versão do GRBL foi GRBL for Ramps 1.4. O link para acesso e download das versões citadas se encontram no Anexo A. O código GRBL transferido para a placa Arduino Mega está disponível no Anexo B.

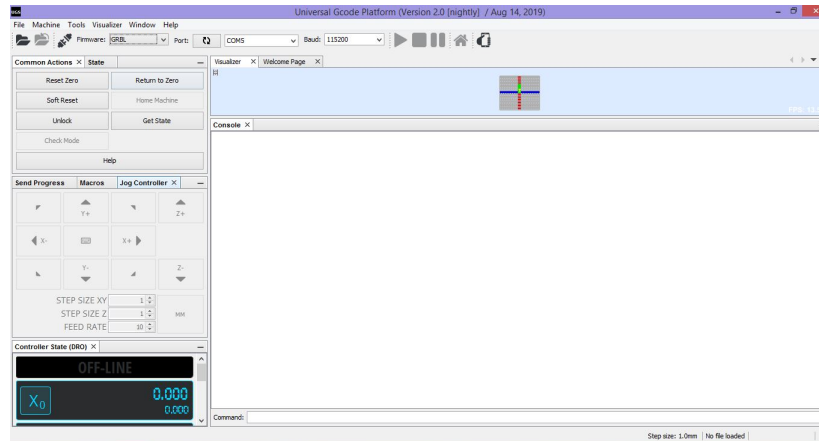


Figura 48 – Interface do software utilizado

3.5 Projeto de máquina a laser

O sistema laser especificado a fim de atender as necessidades do projeto: prototipagem rápida para materiais como mdf e acrílico.

3.5.1 Tubo Laser

De acordo com os requisitos e visando o baixo custo, assim como a difusão no mercado, foi escolhido o laser CO₂, o qual possui custo médio, média vida útil, média qualidade e média manutenção.

Devido ao uso da máquina estar ligado ao auxílio na pesquisa e desenvolvimento dos trabalhos no laboratório a potência do laser a ser utilizado é 100W, ressaltando que a alta velocidade de corte não é um requisito deste projeto.

O modelo especificado (Figura 49) possui as seguintes características:

- Laser CO₂
- Potência: 100W com pico de 120W
- Vida útil: 8000 horas.
- Tensão nominal: 18 kV
- Corrente de funcionamento: 24 a 26 mA
- Tamanho: 1525 mm
- Diâmetro: 80 mm
- Peso: 4,5 kg

- Material do tubo: Vidro
- Temperatura ideal: 26 a 28 °C



Figura 49 – Tubo laser de 100W

Fonte: Big American

O laser com essas características é capaz de cortar MDF, compensado, acrílico, couro sintético e natural, EVA, papel e diversos tecidos de até 20 mm de espessura.

A disposição escolhida para o tubo laser está demonstrada na Figura 50.

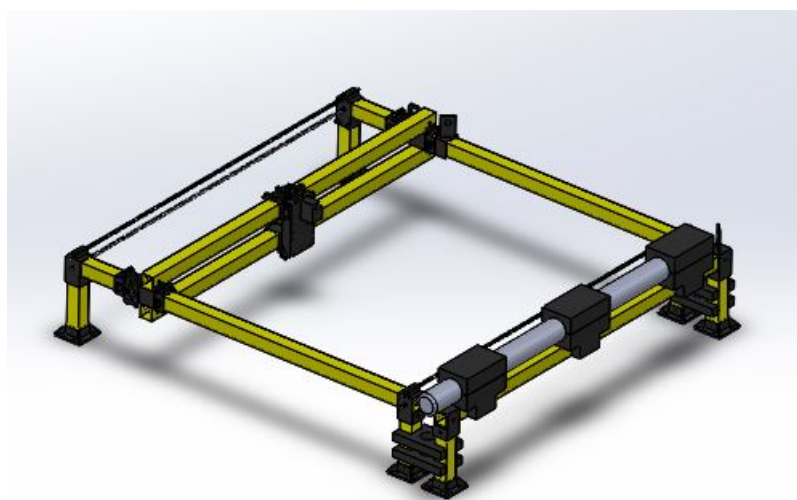


Figura 50 – Disposição de tubo laser

3.5.2 Fonte Laser

Para atender as especificações o tubo laser selecionado de forma que a produzir o feixe LASER é necessário a energização utilizando uma fonte apropriada. A tensão requisitada pelo tubo laser é muito alta, necessitando uma fonte que converta a tensão da rede de energia para em torno de 28kV.

A fonte de mercado selecionada (Figura 51) possui as seguintes características:

- Modelo: CL - 100W
- Tensão de entrada: 220 V
- Frequência de entrada: 47 - 440 Hz
- Tensão máxima de saída: 45 KV
- Corrente máxima de saída: 32 mA
- Vida útil: 10.000 horas



Figura 51 – Espelho Molibdênio para máquina de corte a laser

Fonte: Big American

3.5.3 Sistema de resfriamento

Segundo as especificações do tubo LASER a temperatura ideal é de 26 a 28°C. Para manter o tubo nesta faixa térmica, precisa-se de um sistema de resfriamento que retire calor constantemente, porém não abaixando a temperatura de maneira excessiva pois pode haver condensação dos gases internos ao tubo, prejudicando seu funcionamento e eficácia.

Para dimensionamento do chiller a ser utilizado, calculou-se a potência de resfriamento necessária com base na eficiência do tubo LASER.

Usando as fórmulas, sendo P (Potência), I (Corrente), U (Tensão), Pd (Potência dissipada), Pe (Potência emitida) e Pl (Potência do laser) :

$$P = I.U \text{ (I)}$$

$$Pd = Pe - Pl \text{ (II)}$$

Foi encontrado que a potência dissipada é 1340 W. Por questões de segurança, trabalhou-se com a possibilidade de que toda a energia disponível será dissipada em energia térmica. Assim, a mesma quantidade de energia por tempo que o tubo dissipar (Pd) deverá

de ser retirada do líquido aquecido pelo chiller, com o intuito de manter a temperatura da água constante e realizar a manutenção adequada da temperatura de operação do tubo.

O equipamento que possui a capacidade de refrigeração especificada é o Chiller CW-5200 (Figura 52), com as seguintes características:

- Tensão de entrada: 220 V
- Frequência de entrada: 60 Hz
- Capacidade de Refrigeração: 4982 Btu / h, 1,46 Kw, 1256 kcal / h
- Capacidade do Tanque: 6 L
- Vazão de Água: 10 L/min



Figura 52 – Chiller Modelo CW-5200

Fonte: Central do laser

3.5.4 Espelhos e Lente

Para que o feixe LASER seja direcionado do tubo até o elemento terminal é necessário um esquema de espelhos e uma lente para focalização para corte. Os espelhos foram dispostos no sistema utilizando três peças projetadas para acoplamento no sistema cartesiano (Figura 53). A lente em conjunto com o terceiro espelho compõe uma única peça desenvolvida (Figura 54) para ter o funcionamento como uma ferramenta que é fixada no elemento terminal do robô, garantindo a multifuncionalidade do mesmo.

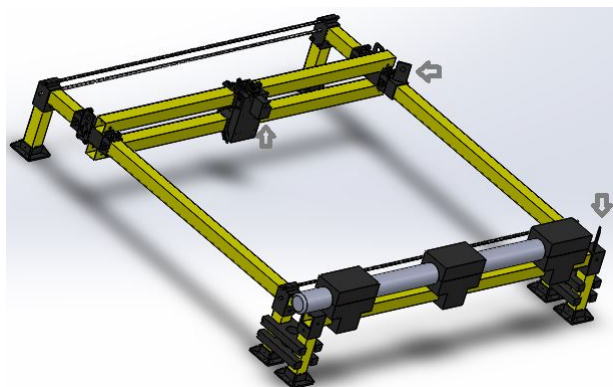


Figura 53 – Disposição dos espelhos no sistema

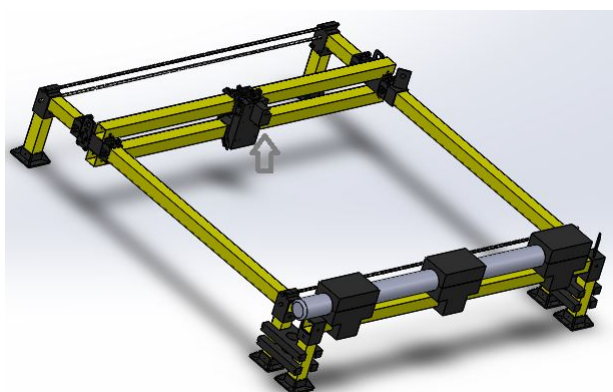


Figura 54 – Peça desenvolvida para fixação no elemento terminal

Em conjunto com o tubo foram selecionados os espelhos (Figura 55) e lente (Figura 56) adequados. O material escolhido para os espelhos foi o Molibdênio devido à uma maior durabilidade e as dimensões das lentes e dos espelhos foram escolhidas de acordo com o feixe de laser e considerando as opções de menor custo no mercado. Dessa forma, a lente estabelecida é com diâmetro de 20 mm e foco de 50,8 mm e os espelhos selecionados são refletores com diâmetro de 20 mm. Ambos são adequados e indicados para máquina laser CO₂.



Figura 55 – Espelho Molibdênio para máquina de corte a laser

Fonte: Micro oficina



Figura 56 – Lente de foco para máquina de corte a laser

Fonte: Ferramentas da china

3.5.5 Custo estimado

Nessa seção é apresentado o custo estimado (Tabela 3) dos materiais a serem adquiridos para a montagem do sistema a laser. É importante considerar a variação de preço com o tempo e ter atenção a situações que tem gastos extras mais caros, como frete de longa distância e importação.

Componente	Preço (R\$)
Tubo Laser	2.459,00
Fonte Laser XeY	1.799,00
Espelhos	132,00
Lente	47,45
Chiller	3.770,00

Tabela 3 – Tabela das peças do sistema laser

3.6 Projeto mecânico

A estrutura para suporte e acoplamento do sistema laser no robô cartesiano foi projetada com peças a serem impressas. O desenho das mesmas se encontra disponível no Apêndice B.

A quantidade de cada peça a ser produzida e utilizada pode ser observada na Tabela 4. As peças estão categorizadas em projetada, existente e adquirida, sendo projetada as peças desenvolvidas no projeto, existente são as peças do projeto (Rodrigues, 2017) e adquirida são as peças disponíveis no mercado para serem compradas, pode ser observada na Tabela 4.

Para montagem completa do sistema é preciso adquirir os itens já citados como: tubo laser, fonte laser, espelhos, lente e chiller. Os itens sugeridos se encontram no Apêndice A.

A descrição e quantidade das peças que compõe o robô cartesiano (Rodrigues, 2017) estão dispostas no Anexo B.

Nome das peças	Quantidade	Categoria
Topo tubo laser	3	Projetada
Base tubo laser	3	Projetada
Ponto 1 espelho	1	Projetada
Ponto 2 espelho	1	Projetada
Elemento terminal acoplado	1	Projetada
Peça entre bases	4	Projetada
Suporte Pés	1	Existente
Pés	2	Existente
Metalon XeY	1	Adquirida
Metalon Pés	2	Adquirida

Tabela 4 – Tabela das peças do sistema laser

4 Resultados

4.1 Testes

Os testes foram divididos em etapas como: testes da estrutura, testes de montagem, manutenção e otimização, testes no sistema de movimentação e testes fim de curso e testes de execução de código G.

4.1.1 Testes estruturais

Os testes estruturais foram essenciais para a validação das peças impressas para substituição de peças quebradas e também das peças alteradas para melhoria do projeto. Após a montagem, o sistema estrutural foi disposto conforme apresentado na Figura 57.

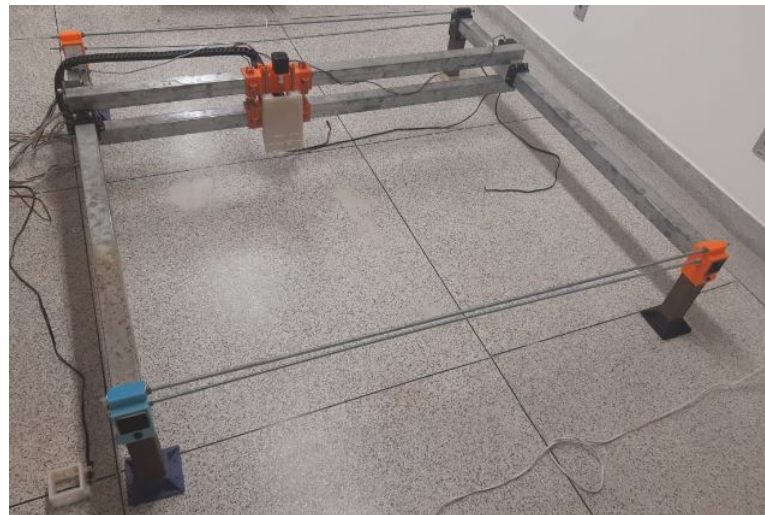


Figura 57 – Sistema montado após retrofit

4.1.2 Testes no sistema de movimentação

Os testes realizados no sistema de movimentação se dividem na primeira etapa que foi a realização de testes dos motores, utilizando o GRBL, Universal G-code sender e manipulando a placa controladora para obter melhor controle da movimentação (Figura 58).



Figura 58 – Sistema de movimentação

Em seguida, foram executados testes de movimentação no sistema de transmissão e observado o desempenho dos motores (Figuras 59 e 60).

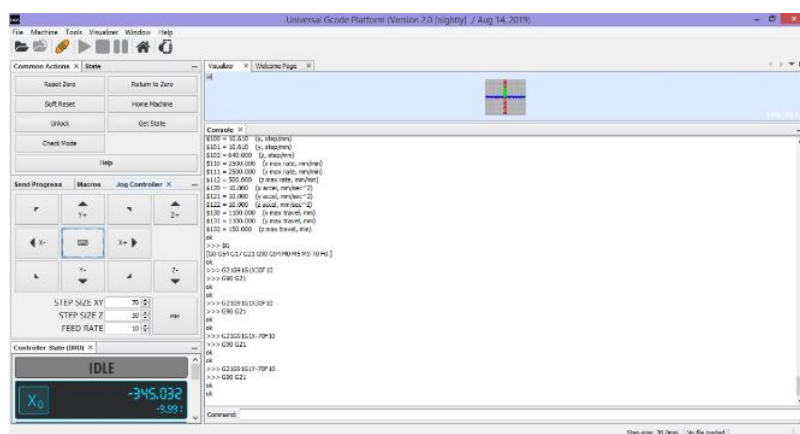


Figura 59 – Movimentação de teste - Universal G-code Sender



Figura 60 – Movimentação de teste

4.1.3 Teste do conjunto otimizado

Foi executado a movimentação do elemento final por meio de um comando que desloca um ou dois eixos simultaneamente, utilizando os três GDL do robô cartesiano. O conjunto demonstrou bom funcionamento, atendendo aos requisitos apresentados no início do projeto (Figura 61).



Figura 61 – Movimentação do sistema completo

4.1.4 Teste dos fim de cursos

Após a instalação dos fim de cursos nos três eixos (Figura 62, 63 e 64), foi realizado o teste de funcionamento dos mesmos.



Figura 62 – Instalação fim de curso eixo X

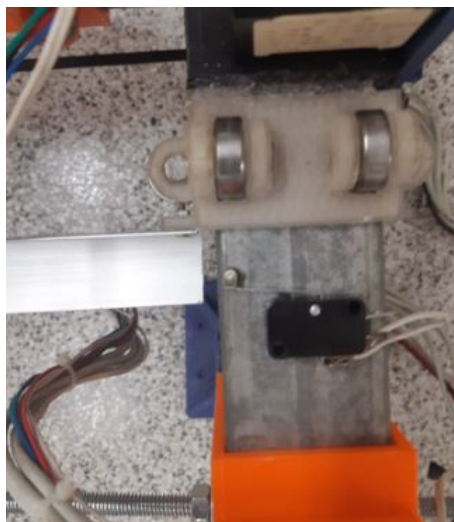


Figura 63 – Instalação fim de curso eixo Y

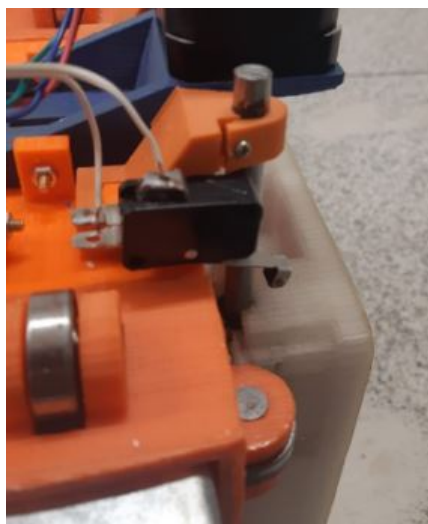


Figura 64 – Instalação fim de curso eixo Z

Para o funcionamento adequado a ligação elétrica implementada no sistema seguiu a configuração disposta na Figura 65. O acionamento dos três fim de curso acontece sem erros, limita a movimentação nos locais definidos para melhor uso do espaço de trabalho e visa a prevenção de acidentes que impliquem a quebra das peças.

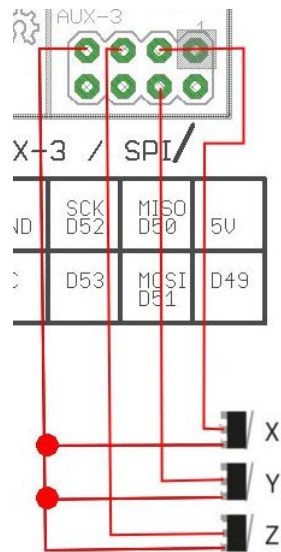


Figura 65 – Ligação elétrica dos fios de cursores

Fonte: Source Forge

4.1.5 Ponteira de teste

Durante os testes realizados foram utilizadas ponteiras de diferentes cores e tamanhos (Figura 66 e 67). Um problema encontrado foi a movimentação da ponteira quando ocorria o deslocamento no eixo X. Experimentalmente foi avaliado que a ponteira mais grossa possui melhor funcionamento considerando o sistema de fixação do robô cartesiano existente. Portanto para os testes em que a ponteira foi necessária, a utilizada foi a ponteira grossa vermelha (caneta hidrográfica ponta grossa) e também foi utilizado material extra (fita) para melhor fixação da mesma.



Figura 66 – Ponteira de teste fina



Figura 67 – Ponteira de teste grossa

4.1.6 Teste de escala

Os parâmetros citados na seção 3.3 foram testados com o funcionamento do sistema. O teste realizado foi: enviar os comandos mover 150 mm no sentido negativo de y, mover 150 mm no sentido positivo de x e mover 150 mm sentido negativo de x e 150 mm no sentido positivo de y ao mesmo tempo, formando assim um triângulo retângulo, isósceles, com os catetos medindo 15 cm (Figura 68).

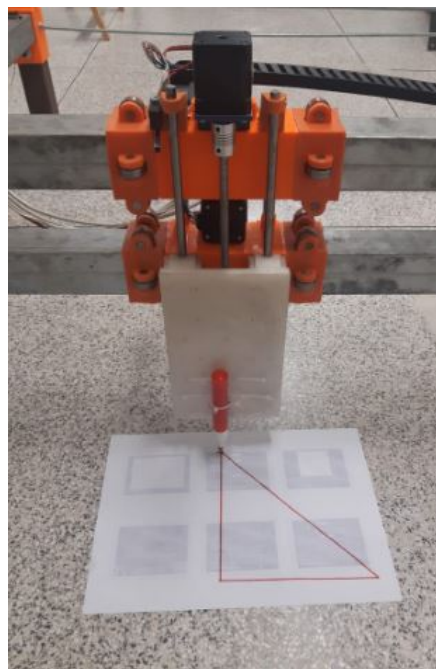


Figura 68 – Teste de escala com triângulo equilátero

Foi averiguado com o uso de régua as dimensões reais plotadas no teste para a validação do mesmo (Figura 69 e 70), os valores foram: 14,9 cm no teste de X e 15,2 cm no teste de Y .

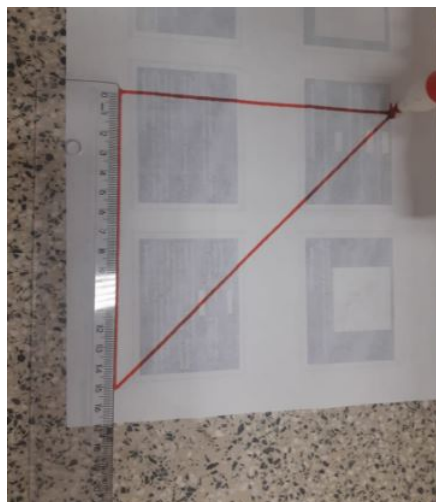


Figura 69 – Teste de escala eixo X

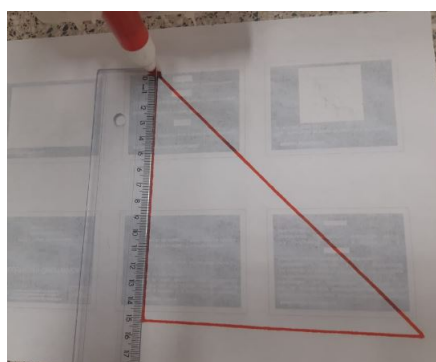


Figura 70 – Teste de escala eixo Y

4.1.7 Teste de execução de código G

Para a realização da reprodução do código G foi utilizado como apoio o site Maker Cam citado no Anexo A. Primeiramente foi desenhado uma circunferência com o raio de 130 mm e movida para o primeiro quadrante ($X+, Y+$) como demonstrado na Figura 71. Após isso, seguiu-se as seguintes etapas para exportação do código G gerado: abrir um arquivo com o formato SVG ou inserir figura, posicionar o esboço na posição desejada, calcular a rota e exportar G-code.

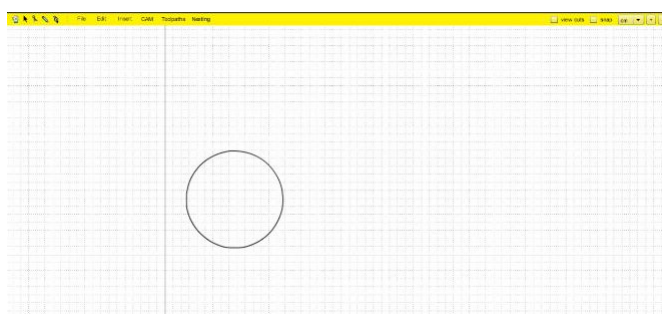


Figura 71 – Tela do Maker Cam com o posicionamento do desenho da circunferência

Com o G-code gerado, é possível abrir o arquivo usando o software Universal G-code Sender e enviar os comandos para a máquina (Figura 72).

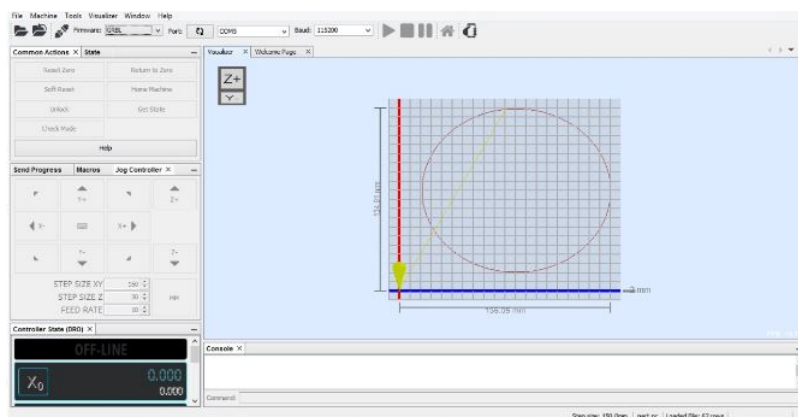


Figura 72 – Tela do Universal G-code Sender com o posicionamento e medidas do desenho da circunferência

Algumas tentativas foram realizadas, a execução dos comandos ocorreram da forma correta (Figura 73), porém foi necessário a exclusão de duas linhas de código (comandos de definição de ponto zero e troca de ferramenta - M6) pois na situação de utilização do robô cartesiano retorna erro, sendo necessário a definição do ponto zero e a fixação da ferramenta escolhida antes de começar a reprodução.

Este teste também possibilitou a análise da importância da fixação da ferramenta utilizada de forma a garantir a qualidade e precisão da máquina.



Figura 73 – Resultado desenho da circunferência utilizando o robô cartesiano modificado

5 Conclusão

Esse trabalho proporcionou um vasto aprendizado sobre um projeto de engenharia com requisitos, prazos e limitações a serem respeitadas. A partir do projeto de adaptação de um robô cartesiano existente para uma máquina de corte a laser, também objetivando o "retrofit" do mesmo possibilitando o correto funcionamento do sistema.

De forma a cumprir o objetivo do trabalho, foi realizado o estudo e análise da estrutura inicial, componentes e parâmetros do robô cartesiano existente, definindo as alterações necessárias e também realizando manutenção na máquina.

Para o projeto das peças foi preciso o estudo sobre o uso de laser para corte, as soluções de mercado e o projeto das peças para acoplamento e suporte dos componentes a serem adicionados para possibilitar o uso de corte a laser.

A fabricação das peças produzidas, alteradas e para manutenção foi uma etapa desafiadora pela ausência de documentação das peças produzidas para o robô existente, sendo necessário realizar engenharia reversa embasada nas medidas das peças impressas, as quais por um intervalo de precisão da impressora se diferiam das projetadas. A montagem do sistema é complexa e objetivava o correto funcionamento da máquina, o que foi validado com os testes realizados.

Por fim, analisando aos requisitos adotados para o projeto inicialmente, e os resultados obtidos, pode-se verificar que o desenvolvimento do trabalho atinge os requisitos propostos, e conclui-se que tais objetivos foram alcançados em sua plenitude.

6 Projetos futuros

Sistema de otimização mecânica que visa a melhoria da estrutura do sistema em relação as características mecânica da máquina e identificando pontos de falha.

Implementação do sistema de corte a laser com a impressão e compra de materiais necessários para a montagem do sistema de corte a laser, revisão do projeto dimensionado e adequações necessárias.

Sistema de controle que possibilite o uso de malha fechada para melhor precisão da máquina, realizando as alterações mecânicas necessárias em conjunto com um firmware implementação dos comandos de controle.

Projeto de caixa para fechamento do sistema, juntamente com um sistema de exaustão que permite a saída do calor gerado pelo sistema laser.

Projeto e implementação de sistema de ajuste fino para a lente e para os espelhos.

7 Referências

(CIMM, 2010) - Corte a laser é usado como ferramenta para prototipagem. CIMM, 2010. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6627-corte-a-laser-e-usado-como-ferramenta-para-prototipagem. Acesso em 25 de fevereiro, 15:30.

(Dias, 2015) - DIAS, Matheus B. Proposta de desenvolvimento de uma máquina de corte a laser para facilitar prototipagem. 2015. N° de Paginas - 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, 2015.

(Edgard, 2006) - Prototipagem rápida : tecnologias e aplicações. São Paulo, Edgard Blücher, 2006

(Fortulan, 2017) - Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM. São Carlos, Carlos Alberto Fortulan, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Fortulan/publication/321162555_ESTUDO_DE_PROPRIEDADES_MECANICAS_E_ANISOTROPIA_EM_PECAS_FABRICADAS_POR_MANUFATURA_ADITIVA_TIPO_FDM/links/5a12b64baca27287ce2a945f/ESTUDO-DE-PROPRIEDADES-MECANICAS-E-ANISOTROPIA-EM-PECAS-FABRICADAS-POR-MANUFATURA-ADITIVA-TIPO-FDM.pdf .Acesso em 25 de fevereiro, 15:30.

(JM Rosário,2010) - Robótica Industrial I: Modelagem, Utilização e Programação. São Paulo, João Maurício Rosário, 2010. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=cbzXOdbJvYoC&oi=fnd&pg=PA19&dq=robô+cartesiano&ots=56kv2Fh0kK&sig=2h5sYuFN5nn5rQbZRvMKD6hJwzg#v=onepage&q=robô%20cartesiano&f=false>. Acesso em 25 de fevereiro, 15:30.

(L Missiaggia, 2014) - Planejamento otimizado de trajetória para um robô cilíndrico acionado pneumaticamente. Porto Alegre, Leonardo Missiaggia, 2014. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/96327> Acesso em 26 de fevereiro, 22:30.

(Quemel e Santana, 2007) - Desenvolvimento de software de controle de uma máquina para prototipagem rápida em Isopor. Brasília, Pedro Henrique de Rodrigues Quemel e Assis Santana, 2007. Disponível em: http://people.csail.mit.edu/psantana/data/files/other/PIBIC2006_PHRQAS.pdf .Acesso em 25 de fevereiro, 15:30.

(Rodrigues, 2017) - RODRIGUES, Bernardo Henrique de Moraes. Robô Cartesiano Cnc: Projeto e construção de um robô cartesiano multifuncional. 2017. N° de Paginas - 90 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

(VMF Santos, 2004) - Robótica Industrial. Universidade de Aveiro, Vítor M. F. Santos, 2004. Disponível em: http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/Humanoid/2013_EmlilioEstrelinha/Dissertação_Emílio_Estrelinha/Datasheets/RoboticaIndustrial-Sebenta2003-2004-v2a.pdf .Acesso em 26 de fevereiro, 22:30.

Anexos

ANEXO A – Versões dos softwares utilizados

Universal G-code sender

Versão: 2.0 Platform (Beta)

Link : https://winder.github.io/ugs_website/download/

GRBL

Versão: GRBL for Ramps 1.4

Link: <https://sourceforge.net/projects/grblforramps14/> Link: <https://github.com/cervilhanina/>

Maker Cam Link: www.makercam.com

ANEXO B – Peças do robô cartesiano existente

CATEGORIA	ITEM	QUANTIDADE		CUSTO R\$		
		NECESSÁRIO	MARGEM	UNITÁRIO	FRETE	TOTAL
FERRAGENS	Metalon Galvanizado 50x50x 1,50 [6 metros]	1	1	R\$ 75,00	0	R\$ 75,00
	Metalon 50x50x1,50 [1 metro]	1	1	R\$ 5,00	0	R\$ 5,00
	Cantoneira Perfil L 1,0x1,0 pol [1500mm]	1	1	R\$ 10,00	0	R\$ 10,00
	Barra Roscada 3/8 pol [3 metros]	1	1	R\$ 15,00	0	R\$ 15,00
	Barra Roscada 5/16 pol [1 metro]	1	1	R\$ 5,00	0	R\$ 5,00
COMPONENTES GERAIS	Correia GT2 [rolo 2 metros]	3	3	R\$ 6,50	0	R\$ 19,50
	Polia GT2 16 dentes	3	3	R\$ 3,75	0	R\$ 11,25
	Plástico ABS para impressora 3D [kg]	1,8	3	R\$ 120,00	0	R\$ 360,00
	Rolamentos 608 [Z, ZZ ou 2-RS]	52	60	R\$ 0,75	R\$ 17,00	R\$ 62,00
	Esteira Porta Cabos 10x30mm [1 metro]	1	1	R\$ 39,24	0	R\$ 39,24
	Acoplamento Motor Passo 5 x 8mm	1	1	R\$ 3,56	0	R\$ 3,56
	Abraçadeiras de Nylon [20cm]	25	30	R\$ 0,07	0	R\$ 2,10
	Eixo Linear 8mm [500mm]	1	1	R\$ 7,00	0	R\$ 7,00
	Rolamentos Lineares 8mm	4	4	R\$ 2,00	0	R\$ 8,00
	Dissipadores de Calor para os drivers	4	5	R\$ 0,50	0	R\$ 2,50
ELÉTRICA/ELETRÔNICA	Shield Ramps 1.4	1	1	R\$ 15,26	0	R\$ 15,26
	Arduino Mega	1	1	R\$ 34,00	0	R\$ 34,00
	Driver A4988	4	4	R\$ 3,00	0	R\$ 12,00
	Motor de Passo Nema 17 [5,5 kgf]	4	4	R\$ 65,00	0	R\$ 260,00
	Fonte Chaveada 24V [mín. 15A]	1	1	R\$ 81,00	R\$ 19,00	R\$ 100,00
	Micro Sensores Fim de Curso	3	3	R\$ 5,40	0	R\$ 16,20
	Cabo 4 Vias para Interfone 26AWG[metros]	10,5	11,5	R\$ 0,50	0	R\$ 5,75
ELEMENTOS DE FIXAÇÃO	Mini Ventilador para os drivers	2	2	R\$ 3,50	0	R\$ 7,00
	Parafuso 5/16 x 1,25"	30	30	R\$ 0,40	0	R\$ 12,00
	Parafuso 5/16 x 3"	8	8	R\$ 0,60	0	R\$ 4,80
	Parafuso M2x12mm	4	4	R\$ 0,08	0	R\$ 0,32
	Parafuso M3x16mm	58	60	R\$ 0,08	0	R\$ 4,80
	Porca auto travante M2	4	4	R\$ 0,25	0	R\$ 1,00
	Porca auto travante M3	42	45	R\$ 0,25	0	R\$ 11,25
	Porca auto travante 5/16"	38	38	R\$ 0,25	0	R\$ 9,50
	Porca comum 3/8"	8	8	R\$ 0,15	0	R\$ 1,20
	Porca auto travante 3/8"	4	4	R\$ 0,35	0	R\$ 1,40
	Arruela Aba Larga 5/16" ou M8	6	6	R\$ 0,70	0	R\$ 4,20
	Arruela comum M2	4	4	R\$ 0,20	0	R\$ 0,80
	Arruela comum M3	10	10	R\$ 0,20	0	R\$ 2,00
TOTAL GERAL					R\$ 1.128,63	

Figura 74 – Listagem dos materiais necessários para a construção do robô cartesiano existente

Fonte: Rodrigues (2017)

PEÇA	QUANTIDADE
PT1 Carro X e Y	6
PT1.1 Carro X	1
PT1.1 Carro X mirror	1
PT2.1 Carro X	2
PT2.2 Carro X	2
SuporteCorreiaX	1
SuporteCorreiaXmirror	1
PT2.1 Carro Y	1
PT2.2 Carro Y	1
PT3.1 Carro Y	1
PT3.2 Carro Y	1
PT4 Carro Y	4
PT5 Carro Y	2
SuportePes	2
SuportePes mirror	2
Pes	4
MontanteMotor X e Y	3
MontanteMotor Z	1
Carro Z	1
FixadorEsteira	1
PrendedorLM8	8
Caixa_Control_1	1
Caixa_Control_2	2
TOTAL	49

Figura 75 – Listagem das peças a serem impressas em ABS para robô cartesiano

Fonte: Rodrigues (2017)

Apêndices

APÊNDICE A – Componentes do sistema de corte a laser sugeridos para aquisição

Tubo laser Link: <https://www.bigamerican.com.br/Tubo-Laser-CO2-100w-pico-130w>

Fonte laser Link: <https://www.bigamerican.com.br/Fonte-Para-Tubo-Laser-Co2-100w>

Espelhos Link: <https://www.microoficina.com.br/espelho-co2-20mm-molibdenio-maquina-laser>

Lente Link: <https://www.ferramentasdachina.com.br/loja/lentes-lente-do-laser-20mm-de-diametro-espelhos-para-co2-maquina-laser-co2-eua-cvd-znse-12mm-15mm-18-milimetros-1905-milimetros-381-127mm-15-polegada-comprimento-foco-5>

Chiller Link: <https://www.centraldolaser.com.br/chiller-cw5200-para-maquinas-de-corte-a-laser>

APÊNDICE B – Peças projetadas para sistema de corte a laser

Modelos 3D: <https://github.com/cervilhanina/projetotcc>

Imagens:

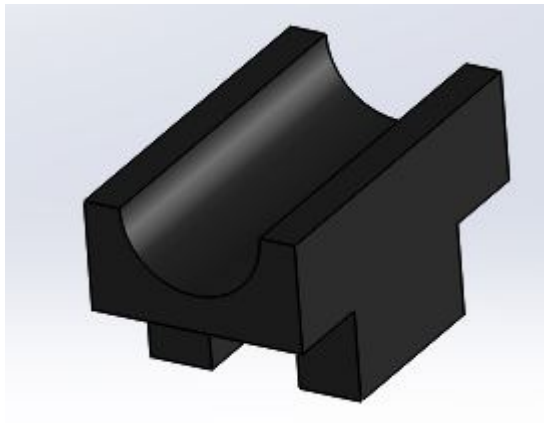


Figura 76 – Peça base tubo laser

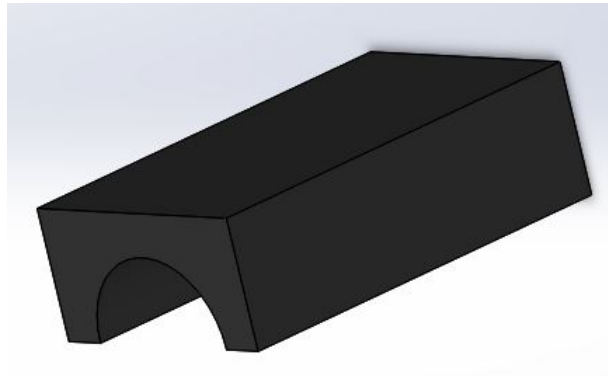


Figura 77 – Peça topo tubo laser

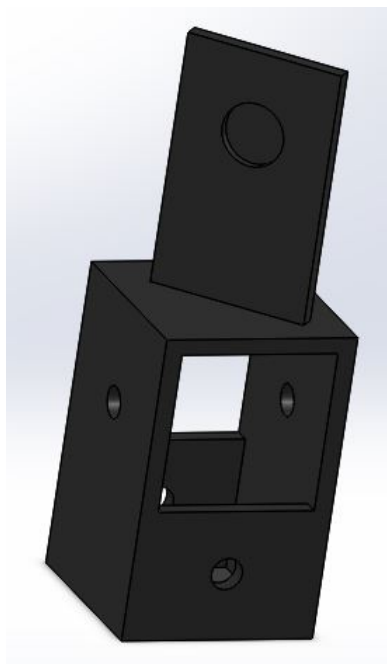


Figura 78 – Peça espelho ponto 1

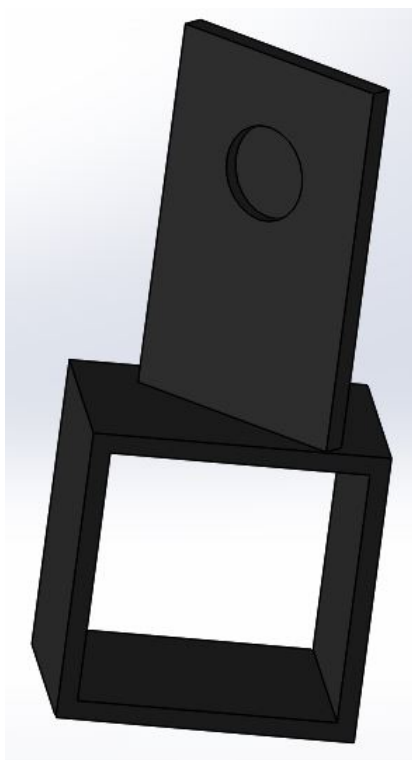


Figura 79 – Peça espelho ponto 2

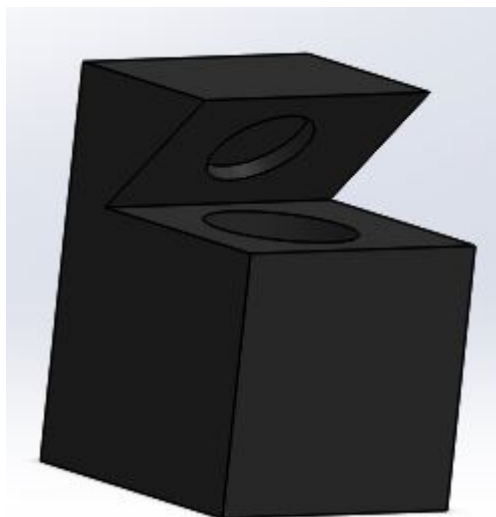
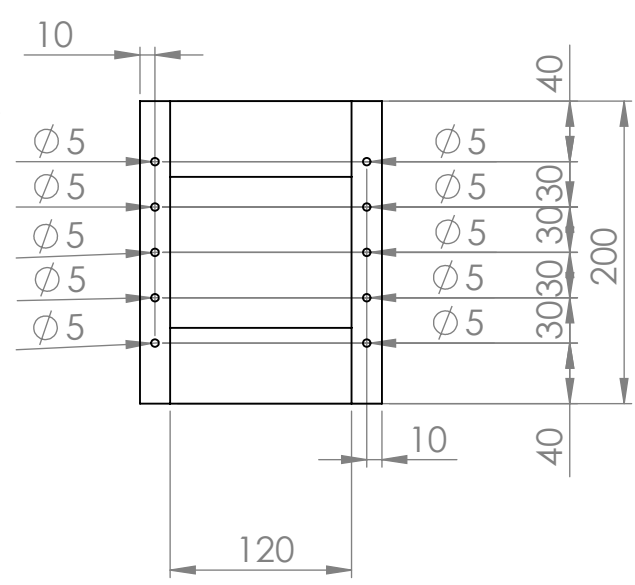
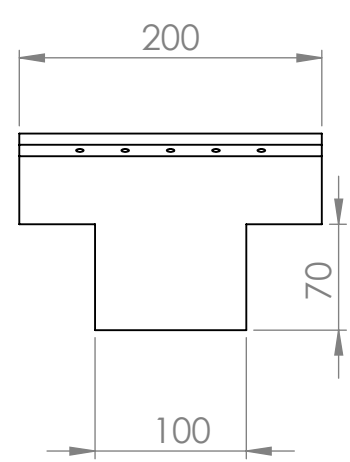
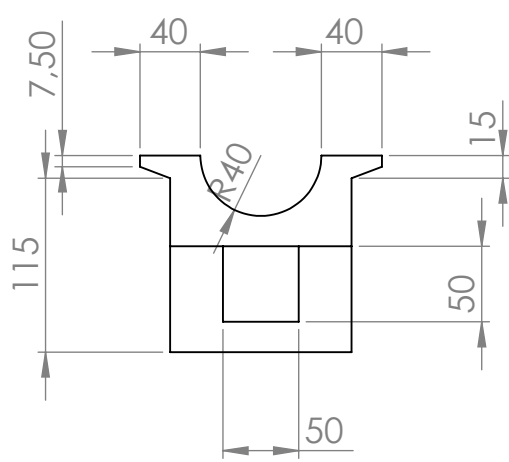
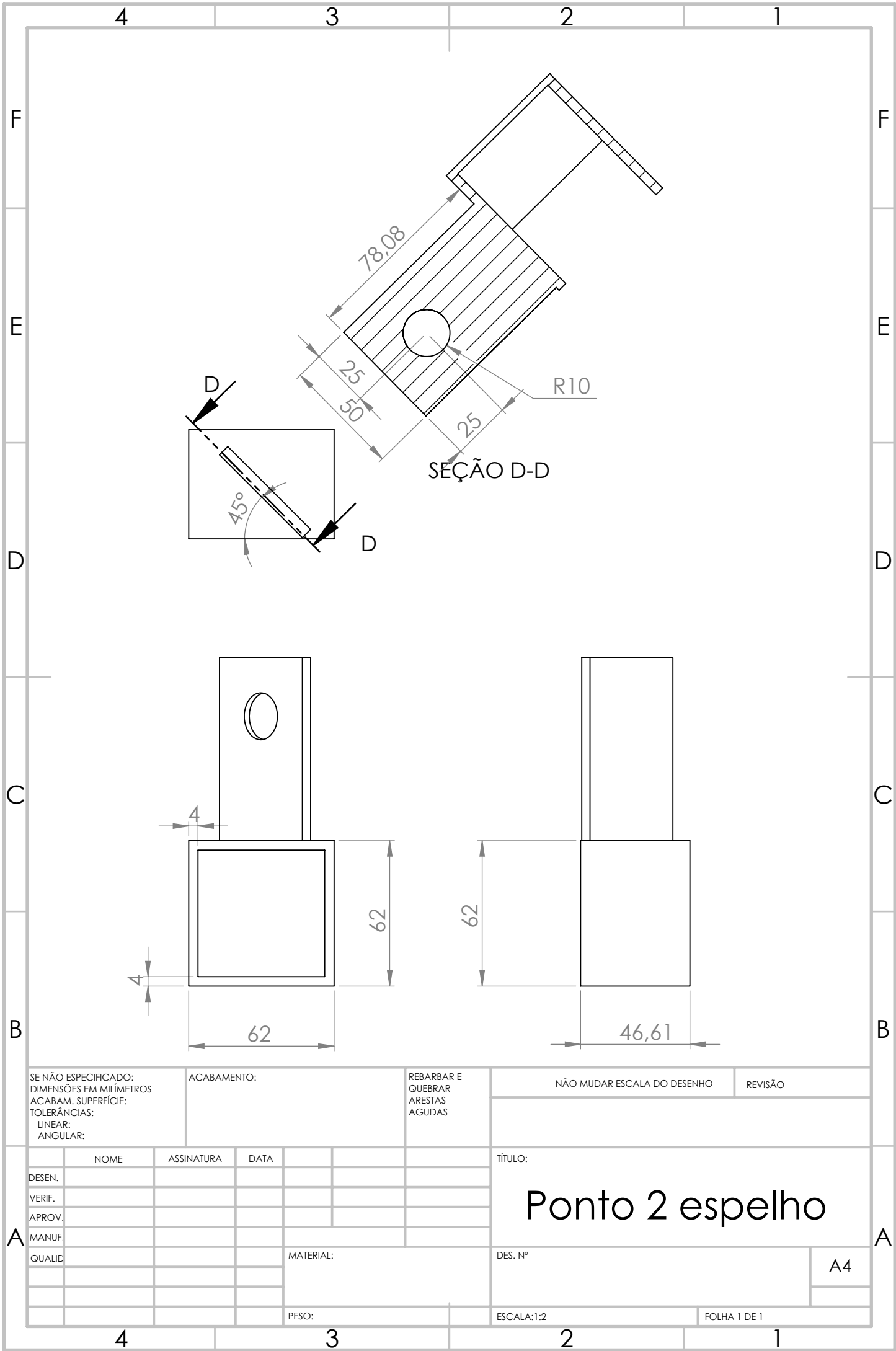
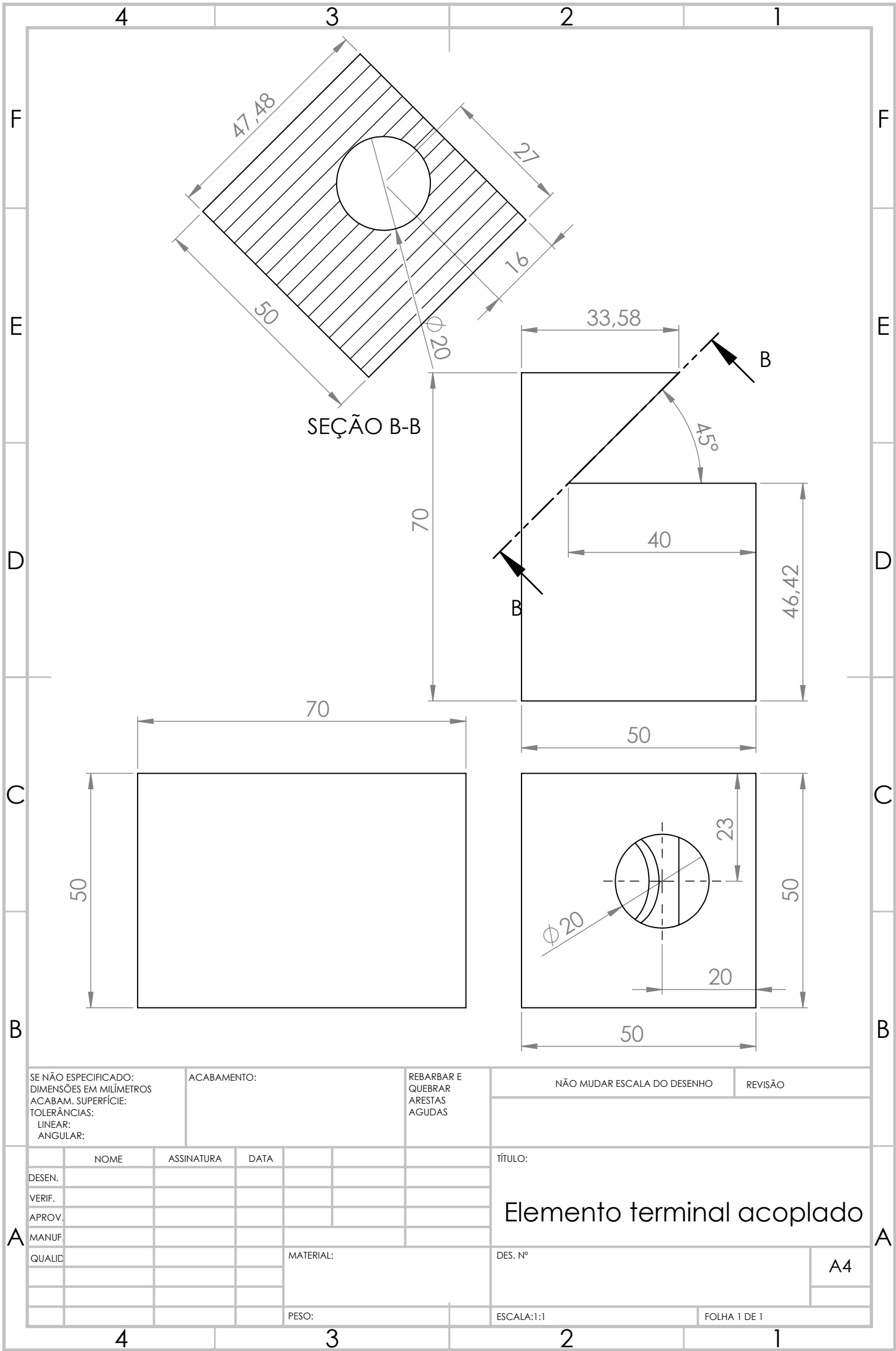


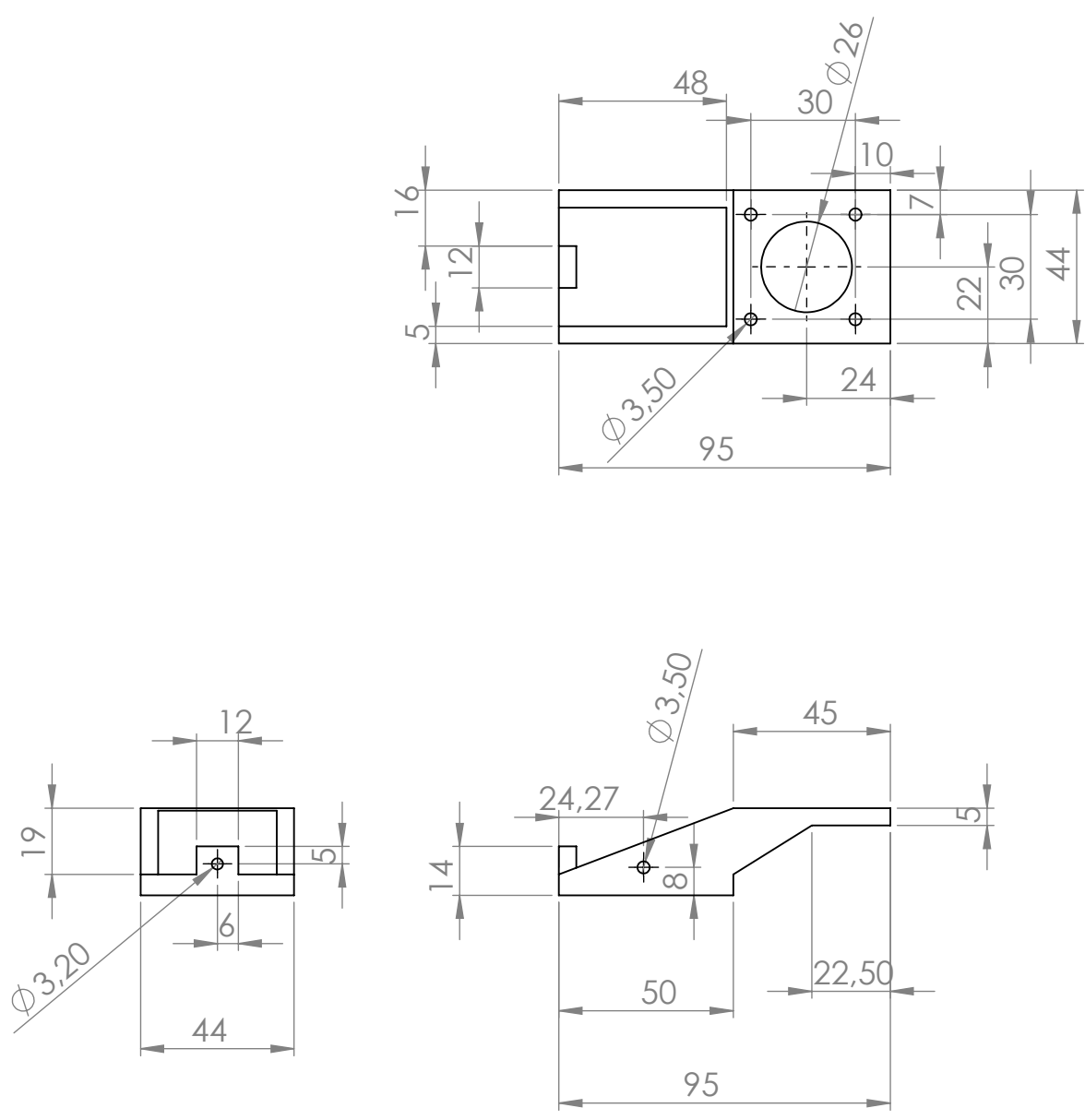
Figura 80 – Elemento terminal



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO																															
<table><tr><td>DESEN.</td><td>NOME</td><td>ASSINATURA</td><td>DATA</td><td></td><td></td></tr><tr><td>VERIF.</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>APROV.</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>MANUF.</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>QUALID</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>						DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA			VERIF.						APROV.						MANUF.						QUALID						TÍTULO:			
						DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA																														
						VERIF.																																	
						APROV.																																	
						MANUF.																																	
QUALID																																							
						Base tubo laser																																	
						DES. Nº																																	
						A4																																	
PESO:						ESCALA:1:5																																	
						FOLHA 1 DE 1																																	



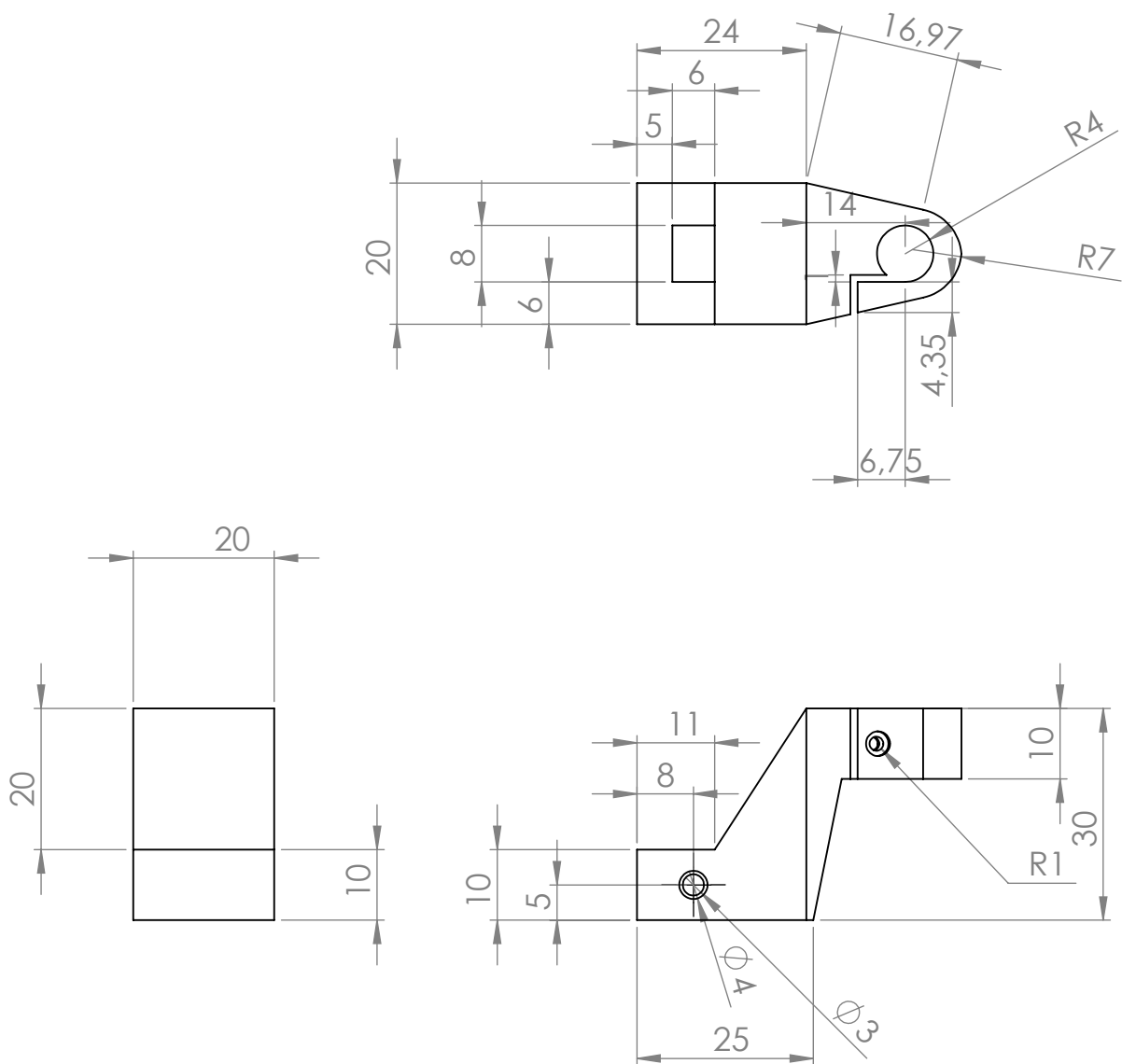




SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
TÍTULO: Peça modificada motor Z						DES. Nº			
PESO:						ESCALA:1:2			
MATERIAL:						FOLHA 1 DE 1			

DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA		
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUALID					

A4	
----	--



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:				ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN.						TÍTULO:					
VERIF.						Peça modificada eixo Z					
APROV.											
MANUF.						DES. Nº					
QUALID.						A4					
MATERIAL:						ESCALA:1:1					
PESO:						FOLHA 1 DE 1					

Peça modificada eixo Z