

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO DE MÁQUINA CNC MULTIFUNCIONAL COM REBATIMENTO DE EIXO
PARA ARMAZENAMENTO

por

Kalvin Jäckel Jokiaho

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Abril de 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Jokiah, Calvin Jäckel
PROJETO DE MÁQUINA CNC MULTIFUNCIONAL COM
REBATIMENTO DE EIXO PARA ARMAZENAMENTO / Calvin Jäckel
Jokiah. -- 2023.
29 f.
Orientador: Felipe Tempel Stumpf.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Impressão 3D. 2. Usinagem 2.5D. 3. Equipamento
armazenável. 4. Máquinas: projeto e construção. 5.
Gravação laser. I. Stumpf, Felipe Tempel, orient. II.
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Kalvin Jäckel Jokiaho

PROJETO DE MÁQUINA CNC MULTIFUNCIONAL COM REBATIMENTO DE EIXO
PARA ARMAZENAMENTO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto mecânico

Orientador: Prof. Felipe Tempel Stumpf

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf (Presidente)

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, Abril de 2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que me apoiou durante todos os momentos do curso, possibilitando a chegada a este momento final.

AGRADECIMENTOS

Novamente, agradeço a minha família por todo o apoio ao longo do curso. Agradeço também ao meu amigo Marcelo Danieli Filho, que graças à curiosidade sobre o projeto, me fez documentar em detalhe o processo de projeto, montagem, testes entre outros, dando possibilidade a este trabalho.

Jokiaho, Kalvin J. **Projeto de máquina CNC multifuncional com rebatimento de eixo para armazenamento**. 2023. 29 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

Fabricação aditiva, usinagem leve, corte e gravação laser vem se popularizando para uso em protótipos e projetos pessoais, assim como outras técnicas utilizando máquinas de comando numérico. O volume ocupado pelo maquinário em questão, porém, pode ser inviável. Como solução, foi projetada uma máquina CNC com a possibilidade de troca rápida de ferramentas e eixo Z rebatível. Decisões de projeto são apresentadas e justificadas neste trabalho, são apresentados dados técnicos relevantes ao projeto, bem como desenhos técnicos utilizados na fabricação da máquina. O projeto resultou em uma máquina adequada no cumprimento das funções projetadas de impressão 3D, usinagem e gravação laser, com velocidade de movimentação de até 80 mm/s nos eixos X e Y, velocidade perfeitamente adequada para o fluxo de material da cabeça de impressão 3D de até 10 mm³/s, e com força e rigidez suficiente para a usinagem de chapas de alumínio em baixas velocidades.

PALAVRAS-CHAVE: Impressão 3D, rebatível, múltipla função.

Jokiaho, Kalvin J. **Foldable multifunctional CNC machine project**. 2023. 29 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

Additive manufacturing, light milling, laser cutting and engraving have been achieving popularity for use in prototyping and personal projects, along other numerical control machinery techniques. The volume occupied by the machinery in question, however, might be unfeasible. As a solution, a foldable CNC machine with quick tool change has been designed. Design decisions are presented and justified along this paper, relevant technical data and technical drawings used on the fabrication of the machine are also shown. The project resulted in a machine with adequate performance on the features it was designed for, those being 3D printing, light milling and laser engraving, with movement speeds up to 80 mm/s on the X and Y axis, perfectly adequate for the print head's 10 mm³/s material flow, and enough force and rigidity for aluminum sheet machining at low speeds.

KEYWORDS: 3D printing, foldable, multiple functions.

NOMENCLATURA

Abreviaturas e acrônimos

FDM	<i>Fused Deposition Modelling</i>	Modelagem por deposição fundida
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>	Fabricação por filamento fundido
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>	Associação nacional de fabricantes de equipamentos elétricos
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	Modulação de comprimento de pulso
AC	<i>Alternating Current</i>	Corrente alternada
DC	<i>Direct Current</i>	Corrente direta
ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>	Polímero termoplástico ABS (Acrilonitrila butadieno estireno)
PLA	<i>Polylactic Acid</i>	Termoplástico PLA (Ácido Polilático)
RAMPS	<i>RepRap Arduino Mega Pololu Shield</i>	Placa de conexões RAMPS
USB	<i>Universal Serial Bus</i>	Porta Serial Universal (conexão USB)
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>	Coefficiente de Temperatura Negativo, tipo de sensor de temperatura.
UV	<i>Ultra Violet</i>	Ultra-violeta.

Siglas não mencionadas aqui indicam padrões ou nomes comerciais de componentes.

SUMÁRIO

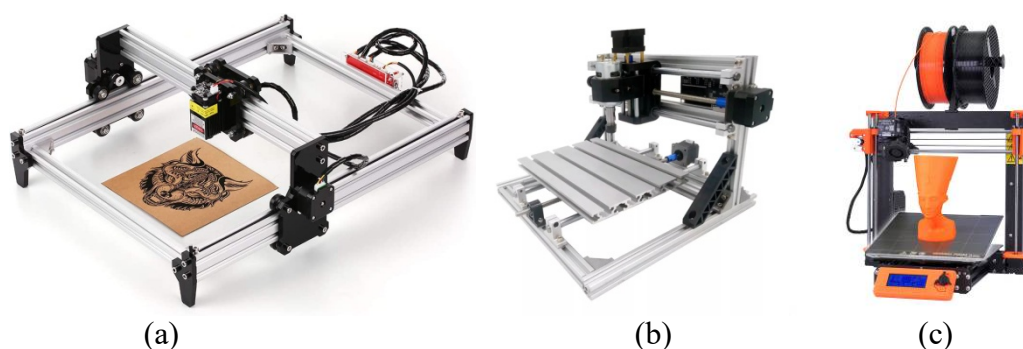
1. INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2. FUNDAMENTAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	2
3. CASO DE ESTUDO	3
3.1. ESTRUTURA	3
3.1.1. MATERIAIS	3
3.1.2 DIMENSÕES EXTERNAS E VOLUME DE TRABALHO	3
3.1.3 SISTEMA DE REBATIMENTO DO EIXO Z	4
3.2 MOVIMENTAÇÃO LINEAR	5
3.3 MOTORES	6
3.4 SISTEMA ELÉTRICO	7
3.5 FERRAMENTAS E BASES DE TRABALHO	8
4. RESULTADOS	9
4.1 FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES	9
4.2 MONTAGEM	10
4.3 FIRMWARE	11
4.4 PROBLEMAS ENCONTRADOS E SOLUÇÕES	11
4.4.1 EIXO X	11
4.4.2 MOTORES DE PASSO	12
4.4.3 NIVELAMENTO E REPETIBILIDADE	12
4.4.4 CABEAMENTO ELÉTRICO	13
4.4.5 PEÇAS EM CHAPA DE ALUMÍNIO	13
4.4.6 ROLAMENTOS DOS FUSOS	13
4.5 PEÇAS IMPRESSAS	13
4.6 USINAGEM	14
4.7 GRAVAÇÃO LASER	14
5. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
ANEXOS	17
ANEXO 1: FIGURA 14	17
APÊNDICES	18
APÊNDICE 1: FIGURA 15	18
APÊNDICE 2: FIGURA 16	18
APÊNDICE 3: FIGURA 17	18
APÊNDICE 4: FIGURA 18	19
APÊNDICE 5: FIGURA 19	19
APÊNDICE 6: FIGURA 20	20
APÊNDICE 7: FIGURA 21	20
APÊNDICE 8: FIGURA 22	20

1. INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o aumento da complexidade de um projeto, cresce a necessidade por ferramentas mais capazes, como máquinas de comando numérico, porém, espaço e recursos financeiros para tais equipamentos podem ser inviáveis, portanto, uma única máquina capaz de realizar mais de uma função é desejável.

Analisando-se as máquinas comerciais de corte laser, usinagem, e impressão 3D, nota-se que as três possuem ao menos uma versão no mercado utilizando movimentação cartesiana em dois ou três eixos. Exemplos das máquinas individuais em questão são mostrados na figuras 1.

Figura 1 a, b e c - Gravadora laser KKcare de baixo custo comercial (a), CNC Robooster 3018 de 3 eixos (b) e Impressora 3D Prusa i3 Mk III (c).



Fontes: vide bibliografia

A convenção X Y Z para largura, profundidade e altura respectivamente será adotada daqui em diante em todos os casos tridimensionais. A máquina da figura 1a utiliza movimentação cartesiana em X e Y, via correias. O eixo X se move ao longo do eixo Y nesta máquina. No caso da fresadora da figura 1b, temos 3 eixos. Neste exemplo, a mesa onde a peça é fixada se move no eixo Y, enquanto o eixo X é fixo, e o eixo Z se move ao longo do eixo X. Como diferença notável do sistema de movimentação, não se utiliza correias, mas sim fusos. Na impressora 3D da figura 1c, a mesa móvel novamente representa o eixo Y como na fresadora, mas o eixo X se move ao longo do eixo Z desta vez, e sua movimentação é por correias.

Como observado, existe semelhança na estrutura e movimentação linear dos eixos das três categorias de máquinas, tornando então possível uma máquina que combine as três funções, compartilhando a estrutura, sistema de movimentação, eletrônica e fonte de energia.

A combinação das três funções já reduz consideravelmente o espaço ocupado, porém, este ainda está limitado ao tamanho da maior máquina. Enquanto que para usinagem e corte laser de chapas a altura da máquina é menos relevante (em geral, as peças trabalhadas no corte/gravação laser de nível doméstico são planas e finas, enquanto na usinagem, torna-se difícil evitar colisões da ferramenta com a peça em peças altas, optando-se assim por usinagem de placas/chapas, do tipo 2.5D), para a impressão 3D esta dimensão se torna relevante. A impressora demonstrada na figura 1c possui dimensões externas de 500x550x400 mm, para um volume de impressão de 250x210x210 mm. Estas dimensões já tornam o armazenamento do equipamento complicado em situações de pouco espaço, e este problema é exacerbado com um volume de impressão maior. Como solução foi adotado um sistema que possa dobrar ou rebater o eixo Z de forma a reduzir a altura da máquina, possibilitando o armazenamento.

Este conceito não é único, e exemplos construídos serviram de inspiração para o projeto. Alguns exemplos são exibidos nas figuras 2a e 2b, porém, não foi encontrado nenhum exemplo de máquinas que combinassem as três funcionalidades estabelecidas (corte/gravação laser, impressão 3D e usinagem) com o mecanismo de dobra/rebatimento.

Figura 2 a e b – Impressoras 3D dobráveis Foldie3D (a) FoldaRap (b)



Fontes: vide bibliografia

Contando com uma estrutura majoritariamente impressa, o conceito da Foldie3D do usuário 3DP VDB (Thingiverse) dependeria de muito tempo na preparação de componentes manualmente, ou necessitaria de serviços de corte de terceiros. A impressora 3D FoldaRap pelo usuário Emmanuel (comunidade RepRap) possui uma excelente documentação ao longo do seu projeto, e este mesmo princípio de dobra do eixo Z foi utilizado no projeto aqui apresentado. Infelizmente, não possuindo as três funcionalidades, e necessitando de uma grande quantidade de componentes impressos, este projeto não foi utilizado diretamente, mas servindo como grande inspiração para o projeto do autor.

Como requisito adicional, foi estabelecida a mínima necessidade de serviços de terceiros de corte e dobra de chapas, impressão 3D ou semelhantes, limitando-se à compra de componentes comerciais e de disponibilidade direta. Considerando-se a necessidade não atendida nem comercialmente, nem como projeto aberto já realizado, iniciou-se o projeto da máquina.

2. FUNDAMENTAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Optou-se pela construção de uma máquina do tipo mesa móvel (comumente conhecida na comunidade em inglês como *bed slinger*, figura de referência no Anexo 1), com um sistema de troca da mesa e ferramenta, com conectores elétricos no flange de ferramenta e o conector equivalente na própria ferramenta, bem como na base de montagem da mesa e mesa aquecida.

A tecnologia de impressão 3D utilizada é a FDM ou FFF, cuja patente (da fabricante Stratasys) expirou em 2009. Optou-se por gravação laser, sem foco no corte laser, por conta do alto custo de um laser com potência adequada ao corte. Para usinagem foi definida a meta de ser adequada para chapas de alumínio em baixas velocidades, ou chapas plásticas e de madeira em velocidades moderadas.

Devido às relativamente baixas cargas no conjunto, bem como a dificuldade de otimização em termos de redução de uso de materiais, o projeto concentra-se na obtenção da funcionalidade apenas. Modelagem 3D foi utilizada como ferramenta de projeto, utilizando-se

o software gratuito Trimble SketchUp. Moldes de corte, furação e dobra de chapas foram confeccionados no software Autodesk AutoCAD.

3. CASO DE ESTUDO

3.1 ESTRUTURA

3.1.1 MATERIAIS

Optou-se pela construção de uma estrutura em perfis estruturais V-Slot (Apêndice 1), com chapas cortadas em alumínio de 2, 3 e 4 mm de espessura, chapas cortadas e dobradas em aço galvanizado de 0,5 e 1 mm de espessura, e perfis de alumínio em “L”.

A escolha dos perfis estruturais V-Slot em alumínio se deu devido à facilidade de montagem dos mesmos, podendo ser adquiridos já cortados com grande precisão nas dimensões necessárias por fornecedores nacionais, de excelente qualidade. Também facilitando a montagem, estes perfis contam com um canal em cada face, onde podem ser inseridas porcas apropriadas para os mesmos, ou mesmo a cabeça de um parafuso M5 ou M6 de cabeça abaulada, o qual se prende dentro do canal, juntamente com uma rosca no furo central, isso permite a união de dois perfis perpendicularmente com facilidade (Apêndice 1).

As chapas de alumínio foram escolhidas para montagem de componentes que requerem preciso espaçamento entre furos, devido à sua facilidade de furação e corte, e rigidez estrutural de uma chapa de 3 ou 4 mm de espessura. Estas chapas também foram escolhidas por serem relativamente baratas e de fácil aquisição.

Chapas de aço galvanizado de 0,5 mm de espessura foram escolhidas para a carcaça frontal e alguns suportes de componentes como ventiladores. Chapas de 1 mm de espessura foram escolhidas para reforços estruturais no eixo Z. Estas chapas foram escolhidas por apresentar suficiente rigidez para a aplicação, resistência à corrosão, prévia experiência com a dobra das mesmas, e disponibilidade local, em preços relativamente baixos na forma de retalhos.

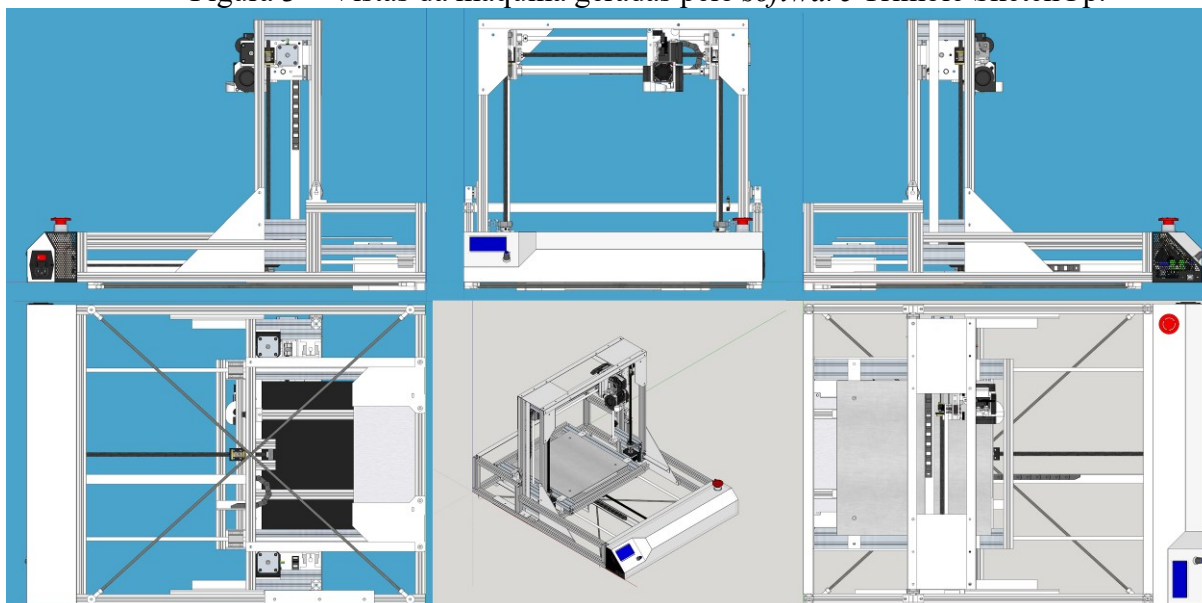
Por fim, os perfis em L foram escolhidos para certos pontos da estrutura onde não há componentes fixos que necessitem de precisão entre furos. A escolha desses perfis se deu pelo seu custo muito inferior aos perfis estruturais V-Slot, porém, pela inferior rigidez dos mesmos e a maior dificuldade de montagem (especialmente corte preciso), fez optar-se pelos perfis V-Slot para a estrutura em maior parte, e quando possível, os perfis L.

3.1.2 DIMENSÕES EXTERNAS E VOLUME DE TRABALHO

A máquina foi projetada para um volume de trabalho o mais próximo possível de um cubo de lado 300 mm. Com a limitação dos componentes como comprimento dos fusos e tamanho dos rolamentos e mancais, obteve-se um volume de trabalho final de 294 x 274 x 280 mm.

As dimensões externas da máquina completa são de 600 x 800 x 544 mm em posição de trabalho. As dimensões X e Y não se alteram com a máquina dobrada, enquanto que a dimensão Z se reduz para apenas 208 mm. Estas dimensões se enquadram dentro do aceitável para a aplicação escolhida. Vistas da máquina projetada são exibidas na figura 3.

Figura 3 – Vistas da máquina geradas pelo *software* Trimble SketchUp.



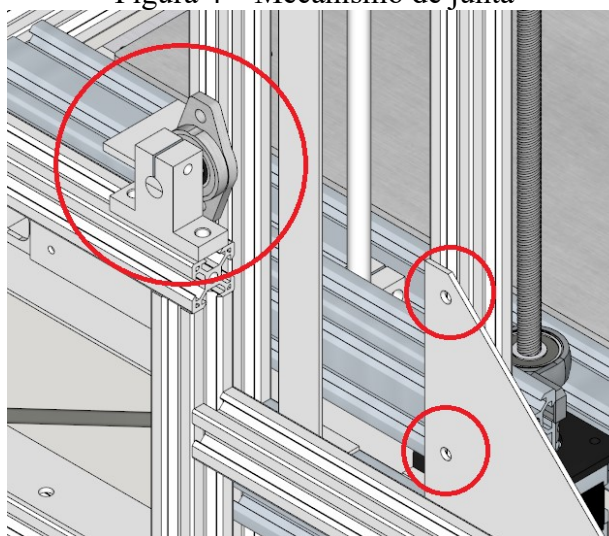
Fonte: o autor

3.1.3 SISTEMA DE REBATIMENTO DO EIXO Z

O sistema de rebatimento da máquina é relativamente simples, composto apenas por uma junta rotativa de cada lado do eixo Z, apoiada sobre batentes em perfil L quando rebatido, e fixado em posição de trabalho com quatro parafusos de aperto manual, dois por lado, em chapas de alumínio de 3 mm de espessura. A rotação da junta é dada por um conjunto composto por um rolamento e mancal KFL08, um curto eixo de 8 mm do mesmo tipo utilizado no sistema de movimentação, e um suporte de eixo SK8 (Visíveis na Figura 4).

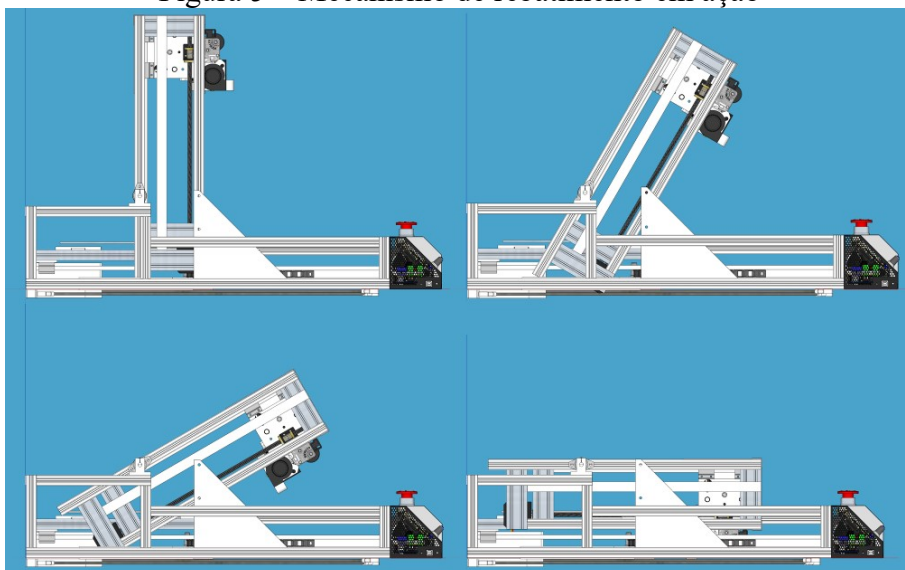
Circulados na figura 4 estão os pontos de parafusos manuais que travam o eixo Z em posição (direita) e os componentes que realizam a rotação do mesmo (esquerda). A altura do eixo de dobra proporciona o posicionamento dos motores do eixo Z atrás de seu ponto de operação, diminuindo o espaço consumido pelo eixo rebatido, cabendo inteiro no comprimento necessário para o funcionamento normal do eixo Y. O processo de rebatimento pode ser visto na figura 5.

Figura 4 – Mecanismo de junta



Fonte: o autor

Figura 5 – Mecanismo de rebatimento em ação

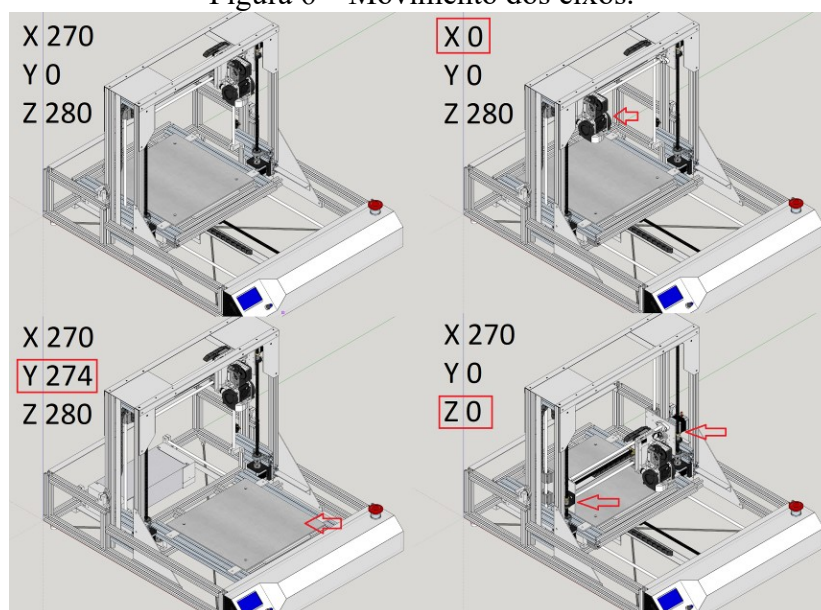


Fonte: o autor

3.2. MOVIMENTAÇÃO LINEAR

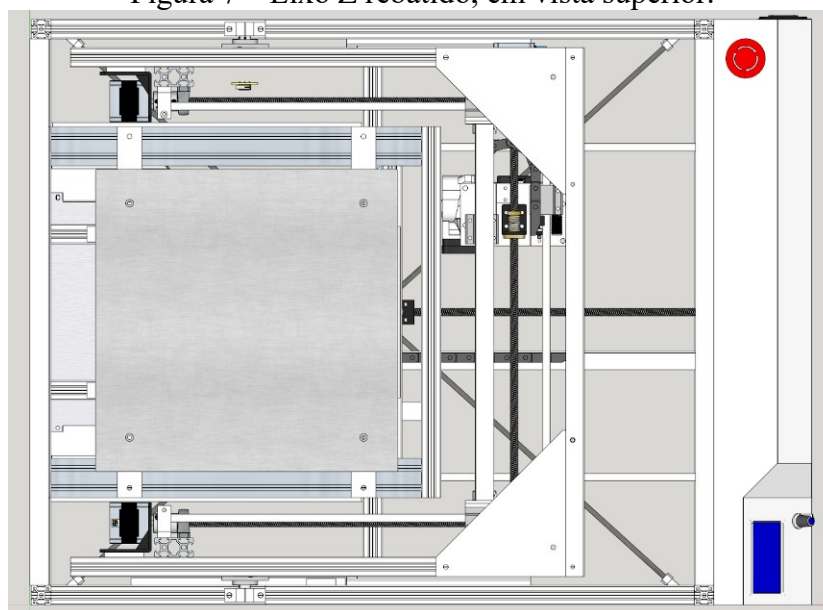
O esquema de movimentação escolhido foi do tipo *"bed slinger"* (Anexo 1), no qual a base onde a peça é manipulada se move no eixo Y, e o eixo Z carrega consigo o eixo X, movimentando-se ao longo de trilhos horizontais. Este sistema foi escolhido por conter uma estrutura em forma de pórtico fixo, na qual o eixo X pode subir, liberando espaço na área inferior. De mesma forma, a plataforma do eixo Y se desloca, podendo ser puxada para trás. A combinação destes movimentos possibilitou o rebatimento completo do eixo Z. A figura 6 ilustra quatro posições da máquina, no canto superior esquerdo a posição guardada ($X=270$, $Y=0$ $Z=280$), à sua direita o eixo X deslocado para $X=0$, abaixo à esquerda o eixo Y deslocado para $Y=274$ (posição máxima), e por fim Z deslocado ao ponto $X=0$. A figura 7 mostra a vista superior da máquina com o eixo Z rebatido.

Figura 6 – Movimento dos eixos.



Fonte: o autor

Figura 7 – Eixo Z rebatido, em vista superior.



Fonte: o autor

Para a movimentação de cada eixo, optou-se por eixos lineares retificados circulares de 8 mm de diâmetro, temperados e cromados. A escolha dos eixos se deu pela disponibilidade de componentes relacionados no mercado, como rolamentos lineares e suportes dos eixos. A necessidade de eixos cromados e temperados se dá pela resistência à corrosão proporcionada pelo acabamento cromado, e alta resistência a riscos ocasionados pelos rolamentos de esferas, que vem a comprometer a suavidade do movimento com seu desgaste. Ao longo destes eixos, deslocam-se rolamentos lineares de esferas do tipo LM08UU.

A conversão da rotação dos motores em translação dos eixos é feita por fusos trapezoidais de 8 mm de diâmetro e 8 mm de passo, do tipo TR8x8, com castanhas anti-folga. Fusos de passo inferior trariam uma maior precisão mecânica ao movimento e maior força transmitida, ao custo de velocidade de deslocamento. Fusos com passo superior não foram facilmente encontrados no momento da construção do projeto. Correias são a escolha mais comum em impressoras 3D comerciais e projetos individuais, oferecendo maiores velocidades e menor custo, porém optou-se pelos fusos de passo 8 mm como uma escolha intermediária entre velocidade de impressão e força para usinagem.

3.3 MOTORES

A máquina utiliza motores de passo em cada um de seus eixos. Os motores escolhidos foram inicialmente dois motores padrão NEMA 23 (Apêndice 2, figura 16a) para os eixos X e Y, dois motores padrão NEMA 17 para o eixo Z, um para cada lado do sistema, e um motor NEMA 17 de apenas 23 mm de comprimento para a extrusora, todos com 200 passos por volta. Os motores NEMA 23 foram escolhidos por já estarem disponíveis ao autor, sendo uma forma de corte de custos, e simultaneamente obtendo-se motores de grande potência. Os motores NEMA 17 do eixo Z foram escolhidos por serem facilmente encontrados usados a um custo aceitável, e também pela facilidade de encontrar suportes de montagem, devido à sua ampla utilização em sistemas semelhantes, o motor da extrusora foi escolhido por ser o padrão necessário para a mesma, e a forma fina para redução de peso neste componente.

Os fusos são acoplados aos motores por meio de um acoplamento flexível, e fixados à estrutura por rolamentos radiais, a fim de remover qualquer carga de aceleração translacional dos eixos do motor, transferindo-a para a estrutura. Os rolamentos são adquiridos em conjunto

com seus mancais, sendo dois rolamentos do tipo KFL08 no eixo X (um em cada extremidade do fuso) e dois rolamentos tipo KP08 novamente, um em cada extremidade, no eixo Y e em cada lado do eixo Z.

Posteriormente, os motores dos eixos X e Y foram substituídos por motores NEMA 17 de laço fechado (Apêndice 2, figura 16b), com controladores que conseguem manter ou até retornar sua posição mesmo sendo forçados fora de posição.

3.4 SISTEMA ELÉTRICO

Optou-se por um sistema elétrico de 24 V DC na máquina, para redução da corrente e consequentemente, cabeamento. Todos os componentes da máquina operam em corrente contínua. Tensões adicionais de 32, 12 e 5 V DC são derivadas desta tensão principal de 24 V.

Foi selecionada inicialmente uma fonte AC-DC de saída 24 V especificada para até 15 A de corrente de saída, com dimensões apropriadas para montagem no interior do painel frontal da máquina. A escolha deste componente posteriormente apresentou problemas por não cumprimento de suas especificações, e queimou com a carga de 9 A da mesa nova maior, e foi então substituída por uma fonte de 24 V 30 A, montada na parte traseira da máquina (Fotos das fontes no Apêndice 3).

Para derivação das tensões de 12 e 5 V DC, foram empregados conversores DC-DC do tipo *step down* ou *buck* (Apêndice 4, figura 18a) para redução da tensão de 24 V DC. Estas três tensões DC são fornecidas aos conectores da placa de montagem da ferramenta no eixo X. As correntes máximas especificadas dos conversores de tensão são de 4 A para ambos. A tensão de 32 V foi adicionada posteriormente por meio de um conversor *step up* ou *boost* (Apêndice 4, figura 18b), com corrente máxima de 30 A na saída do conversor (que nunca é atingida, visto a saída máxima da fonte). Esta tensão está disponível apenas no conector de alta corrente da mesa aquecida, após a troca para a mesa de 310 x 310 mm, discutida posteriormente.

Para a ventilação dos componentes são utilizados um total de três ventiladores inicialmente. Um ventilador axial de 30 mm de diâmetro mantém a temperatura do dissipador de calor do bico de impressão (*cold end*) abaixo da temperatura de transição vítrea dos materiais impressos (Apêndice 5, figura 19a). Para materiais que necessitam de ventilação forçada, um ventilador radial de padrão 5015 é utilizado (Apêndice 5, figura 19b). Por fim, para a refrigeração dos controladores de motores de passo foi utilizado um ventilador axial de 80 mm de diâmetro, operando a 12 V ao contrário dos demais ventiladores (Apêndice 5, figura 19c). Este ventilador foi escolhido por ser comum em computadores domésticos, e, portanto, de ampla disponibilidade no mercado. A escolha foi facilitada ainda mais por conta do autor já ter este componente disponível para uso no momento do projeto.

Como forma de redução de custos, optou-se pelo conjunto de placas Arduino Mega e RAMPS 1.6, a placa de desenvolvimento Arduino servindo como processador do sistema, e a placa RAMPS como interface de conexões. A placa Arduino processa a conversão de comandos de código G em movimento da máquina, enviados à esta por meio de uma interface USB (por conversor USB - serial embutido na placa Arduino), ou armazenados em um cartão de memória SD conectado à tela da máquina. Na placa RAMPS são instalados os controladores de motores de passo (ou *drivers*). Inicialmente quatro *drivers* do tipo TMC2208, da fabricante Trinamic. Os *drivers* operam os motores de passo dos eixos X, Y, Z e E (extrusora, entendida no software da máquina como um eixo adicional). Estes *drivers* foram escolhidos por serem silenciosos durante a operação e configuráveis via *software* da máquina. Um pino normalmente dedicado ao controle de servos da placa RAMPS foi utilizado para o controle PWM do laser de gravação. A placa RAMPS também fornece os

divisores de tensão apropriados para lidar com os dois termistores necessários para a impressão 3D.

Como forma de corte de custos, foi utilizado em grande parte do cabeamento o reaproveitamento de cabos de fontes de computadores e assemelhados, retirados de equipamentos defeituosos obtidos pelo autor. Cabos de comprimento inferior ao necessário foram unidos por juntas soldadas e isoladas por meio de termo-contrátil. Em cada um dos eixos foi utilizada uma corrente de cabos, com a finalidade de evitar que os mesmos se enrosquem no sistema móvel. Para a realização do movimento de rebatimento do eixo X e Z, próximo à junta foi deixado um comprimento excedente de cabos, formando um arco.

3.5 FERRAMENTAS E BASES DE TRABALHO

Três diferentes ferramentas foram projetadas (figura 8b), assim como duas bases de trabalho. A estrutura projetada permite a troca fácil destas ferramentas e bases de trabalho, sem a necessidade de ferramentas. Também é possível acoplar novas ferramentas ou bases à máquina, conforme a necessidade.

Foi projetado um flange (figura 8a) que realiza o acoplamento de ferramentas por meio de dois parafusos manuais em dois cantos diagonalmente opostos, enquanto os outros dois cantos do flange retangular possuem pinos, que completam o alinhamento da ferramenta. As conexões elétricas às ferramentas são realizadas por pinos fixos na ferramenta, para os quais o flange possui a conexão fêmea equivalente, especificada para até 3 A por pino.

Figuras 8 a e b – Flange de ferramentas (a) e Ferramentas desenvolvidas, partindo da esquerda: cabeça de impressão, *spindle* para usinagem e furação, e laser para gravação (b).



Fonte: o autor

A base do eixo Y possui porcas montadas nos canais das vigas V-Slot que a compõe para fixação da mesa de impressão ou base de trabalhos de usinagem. A base conta com uma conexão de baixa corrente por dois pinos para o termistor da mesa, e uma conexão de alta corrente XT-60 para o aquecimento da mesa de impressão (Apêndice 6).

Para satisfatória impressão 3D em ABS, é necessária uma mesa de trabalho plana, com aquecimento capaz de atingir pelo menos 110°C na superfície. Inicialmente, por questões de custo, optou-se por uma placa aquecedora de 144 W, de área útil 220 x 220 mm. Esta placa aquecedora foi montada sob uma chapa de alumínio de 3 mm de espessura, com aplicação de pasta térmica entre a placa aquecedora e a chapa de alumínio. Esta placa aquecida então montada por três pontos sobre molas, permitindo a correção de nivelamento da mesa, tarefa de grande importância para a impressão 3D. Sobre esta placa de alumínio é posicionada uma

placa de vidro de 3 mm de espessura, sobre a qual é impressa a peça. Posteriormente esta mesa aquecida foi substituída por uma mesa com área útil de 310 x 310 mm, permitindo uso de todo o volume de impressão. Esta nova mesa recebeu também um aumento de potência por meio de um conversor de tensão de 32 V, elevando sua potência de 220 W para 400 W.

A mesa aquecida tem sua temperatura monitorada por um termistor do tipo NTC, com fator beta 3950 K e resistência de 100 k Ω a 27°C

Uma base feita em madeira é utilizada para fixação de peças para usinagem ou gravação laser. Esta base conta com trilhos para inserção de um parafuso M10 de cabeça sextavada, para utilização de suportes fixadores do material a ser usinado ou gravado.

Foi escolhida uma extrusora do tipo Titan, projetada pela fabricante E3D, porém uma reprodução de custo inferior, devido ao elevado custo da peça original. Devido à sua redução mecânica 3:1, é possível a utilização de um motor de passo fino, de menor potência. Para a fusão do filamento optou-se por um conjunto *hot end* do tipo E3D V6, também uma reprodução de custo inferior devido ao custo do componente original. O *hot end* utiliza um aquecedor de 40 W de potência para fusão do filamento plástico durante a impressão. O valor de potência é o mais comum comercialmente, e adequadamente potente para o fluxo volumétrico de material extrudado. Um termistor idêntico ao da mesa aquecida monitora a temperatura do bico de impressão.

O ventilador radial do tipo 5015 possui um duto impresso para direcionar o ar diretamente abaixo do bico de impressão. Também foi adicionado posteriormente um sensor de nivelamento automático, inicialmente um servo motor posicionando uma chave tátil sobre a mesa de impressão quando necessário, e posteriormente um sensor do tipo 3D-Touch.

Para a ferramenta fresadora, optou-se por um motor DC 24 V do tipo RS-775, com uma pinça tipo ER-11 acoplada ao seu eixo. Para evitar problemas com o transistor controlador do motor, foi instalado um diodo em polaridade reversa como filtro de picos indutivos.

O laser para gravação foi selecionado para também atender à tarefa de exposição de máscara UV, utilizada na fabricação de placas de circuito impresso. O comprimento de onda do laser, portanto, é de 405 nm, com potência de saída de 500 mW, do tipo diodo. O laser escolhido possui já um controlador limitador de corrente e controle de potência média via comando PWM. Considerando o elevado custo do laser, a potência do mesmo ficou limitada a gravação.

4. RESULTADOS

4.1 FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES

Como requisito do projeto, os componentes estruturais foram todos fabricados em ambiente doméstico, sem a contratação de serviços de terceiros para corte e dobra de chapas, usinagem ou impressão 3D. Os componentes foram produzidos utilizando-se ferramentas manuais como serras manuais, do tipo “tico-tico”, furadeira manual, entre outros.

Em todos os casos, utilizando-se de experiência prévia com a construção de projetos no ambiente doméstico com ferramentas manuais, evitou-se qualquer tolerância pequena para cortes e dobras, sendo qualquer encaixe e alinhamento de maior precisão (neste caso, tolerâncias na classe de $\pm 0,3$ mm) relegado aos furos. Para obtenção de precisão aceitável nas operações de corte, dobra e furação, foram utilizados gabaritos impressos em escala 1:1, colados sobre o material a ser trabalhado. Em seguida, os furos são marcados com auxílio de um punção, e os furos foram feitos aumentando-se progressivamente o seu tamanho, iniciando-os com uma broca de 2 mm.

Para certos componentes, maiores do que uma folha A4 ou até em alguns casos, maiores que uma folha A3, foram adicionadas ao desenho da peça linhas para permitir o alinhamento

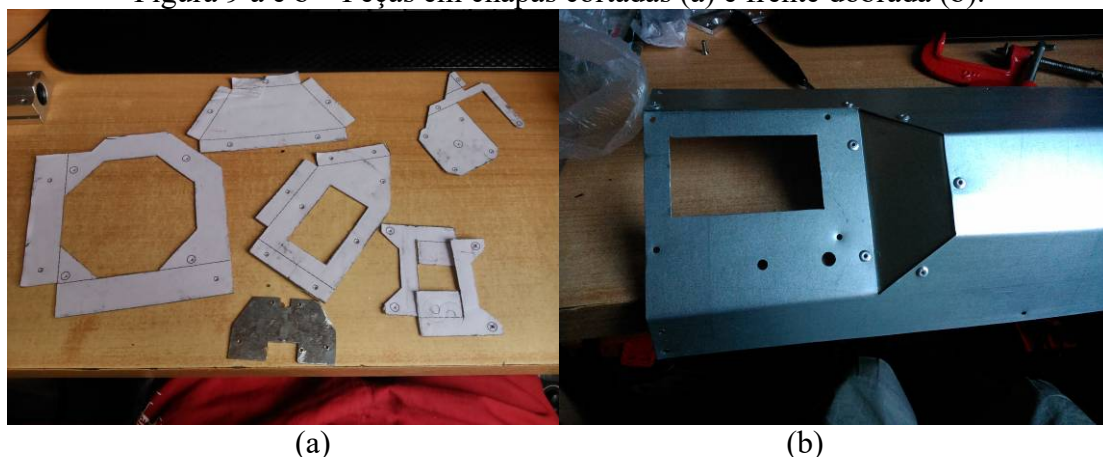
dos gabaritos entre si. Os gabaritos foram então cortados de forma a partir a linha de alinhamento em mais de um ponto, em apenas um dos gabaritos, enquanto o outro se mantém inteiro. Colando-se os gabaritos com alinhamento correto entre todas as linhas partidas garante então um alinhamento aceitável ao gabarito, considerando os processos de furação, corte e dobra manuais.

Os componentes em alumínio foram feitos por corte e furação, sem a utilização de dobras. Como diferencial em relação às chapas de aço, devido à sua espessura, foi possível a geração de roscas nos furos de montagem de componentes.

As vigas V-Slot foram compradas cortadas nas dimensões especificadas, sendo este um alívio nos requisitos de fabricação inteiramente manual, visto o fato de estas vigas serem adquiridas por padrão em um tamanho cortado sob medida. As vigas necessitaram ainda de algumas modificações. Furos foram adicionados para passagem de parafusos de montagem ou chaves para aperto destes, e roscas foram adicionadas às vigas que não possuíam este serviço realizado, ou em furos realizados posteriormente onde a rosca foi necessária.

Os componentes em chapas de aço foram feitos de forma semelhante aos componentes em alumínio, porém com dobras em algumas peças (figura 9). As dobras foram realizadas com auxílio de uma morsa para fixação da chapa, que foi dobrada manualmente, seguida de achatamento da dobra com um martelo. Para as duas chapas longas da parte frontal, foi necessário o uso das vigas V-Slot da estrutura, presas à lateral reta de uma mesa de madeira, visto a dimensão grande da peça, a qual a morsa não comportou.

Figura 9 a e b – Peças em chapas cortadas (a) e frente dobrada (b).



Fonte: o autor

Os perfis L foram adquiridos na forma de barra única de 6 m de comprimento, e cortados sem preocupação com precisão no local de compra, para transporte. Os pedaços cortados foram então cortados novamente, com maior cuidado com a precisão, e furados manualmente. Deste perfil foram feitos os suportes e guias para as correntes de cabos dos três eixos, visto sua pequena necessidade de suportar esforços, baixo custo e formato conveniente.

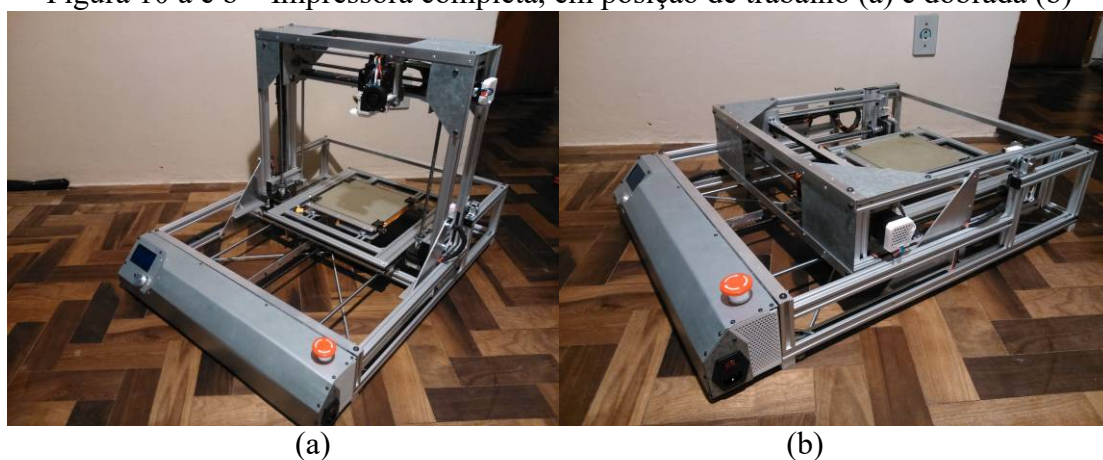
Para certos componentes foram confeccionados adaptadores e espaçadores em polipropileno. Componentes que necessitaram de tais espaçadores e/ou adaptadores são: extrusora, sensores de fim de curso em Y e Z, e os conversores de tensão de 12 e 5 V.

4.2 MONTAGEM

Para a montagem da estrutura, foram utilizados parafusos M6 de cabeça abaulada montados no furo central das vigas V-Slot, este parafuso então se fixando no interior do canal da viga estrutural (Apêndice 1). Em alguns componentes do eixo Z, parafusos M6 foram

fixados transversalmente na viga, em um furo com rosca. Rebites são utilizados para fixação permanente de chapas de aço galvanizado, como no caso da cobertura frontal, e no reforço estrutural superior do eixo Z, onde são fixadas as chapas de aço nos perfis L. Componentes foram montados nos perfis V-Slot com as porcas apropriadas para estes ou nas devidas placas de alumínio, utilizando-se parafusos M3, M4 ou M5, o qual for apropriado ao componente. Os motores de passo do eixo Z foram montados em suportes comercialmente disponíveis, e então fixados às vigas do eixo. Os motores NEMA 23 foram fixados com parafusos longos M5 e espaçadores em alumínio a chapas de alumínio com rosca. Entre as tarefas de montagem, destaca-se como a mais trabalhosa o cabeamento da máquina. Não somente a passagem dos cabos por dentro de suas correntes, como também a identificação e crimpagem de conectores apropriados em suas pontas. A máquina completa pode ser visto na figura 10 a e b.

Figura 10 a e b – Impressora completa, em posição de trabalho (a) e dobrada (b)



Fonte: o autor

4.3 FIRMWARE

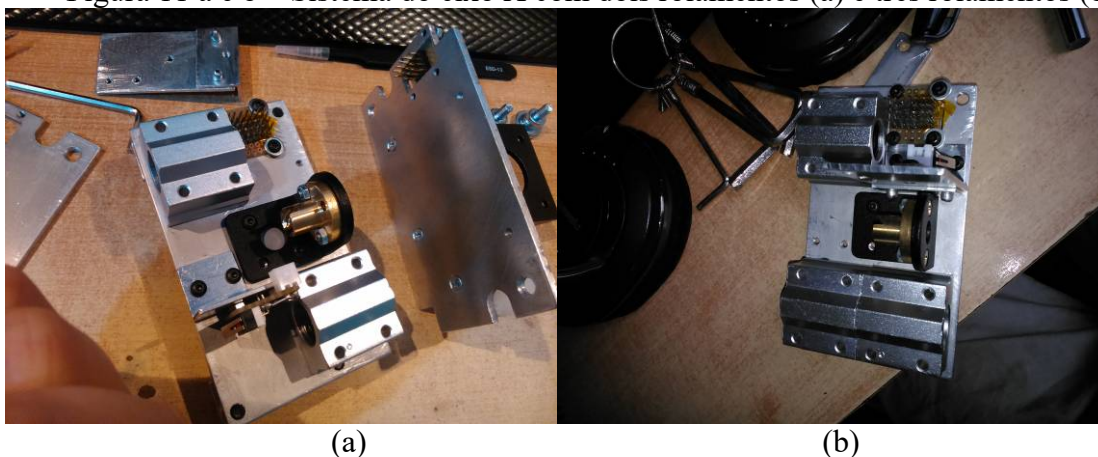
O *Firmware* instalado na máquina foi o Marlin 2.0, que atende a todas as exigências de especificações, de excelente desempenho na placa selecionada, e amplo suporte na comunidade desenvolvedora do mesmo. O *firmware* Marlin é gratuito, com licença GPL-3.0. Este *firmware* é responsável pela conversão de código G em pulsos para os motores de passo, incluindo cálculo de aceleração para cada eixo, matrizes de compensação de nivelamento, interpretação de sinal de sensores, entre outros.

4.4 PROBLEMAS ENCONTRADOS E SOLUÇÕES

4.4.1 EIXO X

Durante a montagem, percebeu-se que a rigidez do eixo X não era satisfatória com dois rolamentos lineares (figura 11a), permitindo movimento do flange no eixo X facilmente. Este problema foi corrigido antes do final da montagem. Um terceiro rolamento foi adicionado na parte inferior do carro do flange, sendo necessária a remoção de uma das chaves de fim de curso do eixo X (figura 11b).

Figura 11 a e b – Sistema do eixo X com dois rolamentos (a) e três rolamentos (b).



(a)

(b)

Fonte: o autor

4.4.2 MOTORES DE PASSO

Os motores NEMA 23 do eixo X e Y apresentaram travamentos repentinos, ocorrendo apenas em velocidades de movimento específicas, porém não podendo ser ignorados, pois ocorriam especificamente dentro de uma faixa de velocidades necessária para impressão 3D satisfatória. Os travamentos, conhecidos como “*stepper stall*” ocorriam nestes motores em função de uma combinação de ressonâncias mecânicas do mesmo, com ressonâncias eletromagnéticas nas bobinas do motor. A solução para tal problema se deu contra intuitivamente com a redução da corrente de operação.

O desempenho dos motores NEMA 23 mesmo assim não foi satisfatório, estes problemas ainda ocorriam ocasionalmente, resultando em perda de posicionamento de um dos eixos (normalmente o eixo Y), além de um forte ruído nos motores em faixas específicas de funcionamento. Como solução, foram adquiridos motores de passo de laço fechado do fabricante BIGTREETECH, de modelo S42B 1.1 (Apêndice 2, figura 16b). Estes motores são capazes de detectar sua posição angular, corrigindo falhas posicionais continuamente. Os motores escolhidos não necessitam de controle especializado na placa principal da impressora, ou grandes ajustes no *firmware* da máquina, tendo o seu controlador embutido no próprio motor, operando como um conjunto independente, interpretando o sinal de *drivers* de motores de passo normalmente enviados pela placa-mãe de passo e direção.

Um dos drivers de motor de passo antes utilizados nos eixos X e Y foi reutilizado para o eixo Z, tornando o controle dos dois lados do eixo Z independente, permitindo o nivelamento mecânico do eixo automaticamente.

4.4.3 NIVELAMENTO E REPETIBILIDADE

O nivelamento correto da mesa de impressão é uma das partes mais importantes na confiabilidade de impressões 3D. Uma diferença de apenas 0,2 mm entre pontos da mesa de impressão pode causar o desprendimento da peça em um ponto e o entupimento do bico de impressão em outro.

Inicialmente, este processo de nivelamento era feito de forma manual, com uso dos três parafusos de suspensão da mesa, porém, ao contrário de uma impressora de montagem fixa, o rebatimento do eixo Z constantemente causava pequenos desalinhamentos. Este nivelamento manual tornava-se então obrigatório após o posicionamento do eixo Z em posição de trabalho. A eliminação desta tarefa foi a primeira prioridade após o funcionamento da máquina ser constatado, e foi então instalado o servo motor com chave para compensação de nivelamento automática da mesa (Apêndice 7).

4.4.4 CABEAMENTO ELÉTRICO

Um problema que se demonstrou ao longo prazo foi a quebra das juntas soldadas do cabeamento. O reaproveitamento dos cabos por meio de juntas soldadas causou pontos rígidos com juntas que não resistem dobras a se posicionarem no interior das correntes de cabos, onde a dobra da junta é esperada. Seções de cabos defeituosos foram substituídas e emendas realizadas fora das correntes de cabos. Por fim o cabeamento no interior das correntes de cabos foi substituído por completo.

4.4.5 PEÇAS EM CHAPA DE ALUMÍNIO

Embora a precisão dos furos das peças fabricadas em chapas de alumínio fosse satisfatória para funcionamento da máquina, pequenos desalinhamentos destes furos causaram desalinhamentos nos rolamentos axiais, que em longo prazo apresentaram desgaste acentuado. Outros pontos problemáticos destas peças foram os furos com rosca. Vibrações da máquina em operação naturalmente afrouxaram os parafusos fixados nesses pontos, e ao serem apertados novamente, algumas roscas não resistiram, e tiveram filetes arrancados, não sendo possível o aperto subsequente. Como solução para estes pontos, os parafusos foram substituídos por mais longos, e uma porca adicionada ao lado oposto da chapa. Posteriormente, uma reforma completa foi realizada na máquina, com novas peças em chapas de alumínio, rolamentos novos, cabeamento novo entre outras melhoras realizadas. A fixação de parafusos em roscas feitas na chapa de alumínio foi evitado ao máximo, e trava-roscas foi utilizado em todos os parafusos instalados.

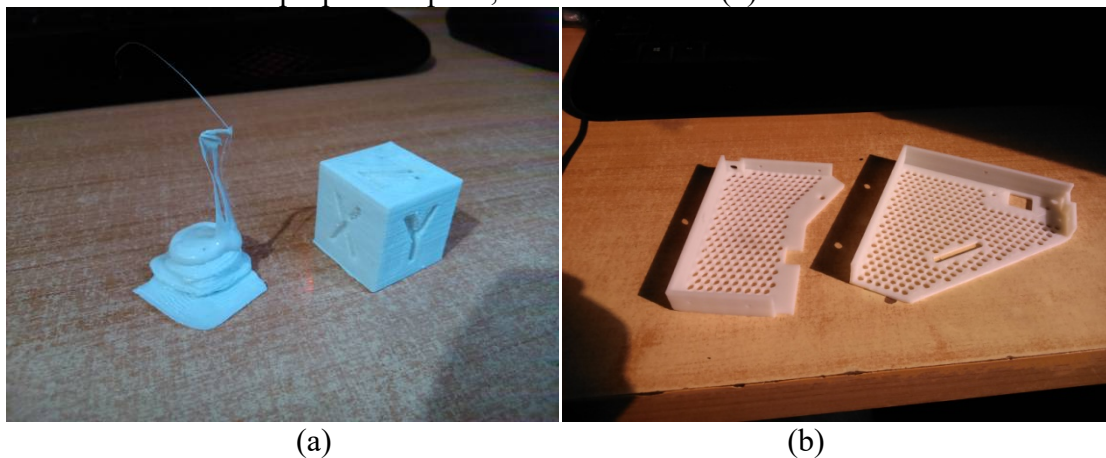
4.4.6 ROLAMENTOS DOS FUSOS

As forças e impactos axiais exercidos nos rolamentos foram superiores ao esperado, especialmente considerando a natureza repetitiva dos movimentos. Desgaste dos rolamentos radiais foi percebido em aproximadamente quatro meses de uso por meio de vibrações e ruídos coincidentes com a velocidade de rotação do fuso nos eixos X e Y. Estas vibrações se demonstraram nas peças impressas como artefatos visuais periódicos (Apêndice 8). Durante a reforma do equipamento foram instalados rolamentos axiais nos eixos X e Y, e removida a fixação do eixo do rolamento radial, este servindo apenas como apoio do fuso.

4.5 PEÇAS IMPRESSAS

Após os testes de movimento inicial, a primeira peça a ser impressa foi um cubo de testes de 20 x 20 x 20 mm em PLA. A falta de conhecimento sobre os parâmetros esperados e ausência do ventilador de peça (devido à falta do duto necessário para guiar o ar somente à peça) resultou em uma massa de plástico derretido apenas, sem a mínima semelhança com o modelo esperado (figura 12a). O autor tem esta peça ainda guardada. Não somente os parâmetros de temperatura e ventilação estavam incorretos para o material escolhido inicialmente, um erro de configuração do *firmware* da máquina em conjunto com o *software* de fatiamento causou um corte no suporte de base da peça. Diminuindo-se a velocidade de impressão (dando ao material tempo de resfriar ao ar) e reduzindo-se a temperatura do bico de extrusão, foi possível obter a peça esperada, com poucos defeitos na superfície superior por conta da falta de ventilação forçada na peça.

Figura 12 a e b - Primeira e segunda impressão realizadas (a), e peças em ABS da própria máquina, feitas na mesma (b).



Fonte: o autor

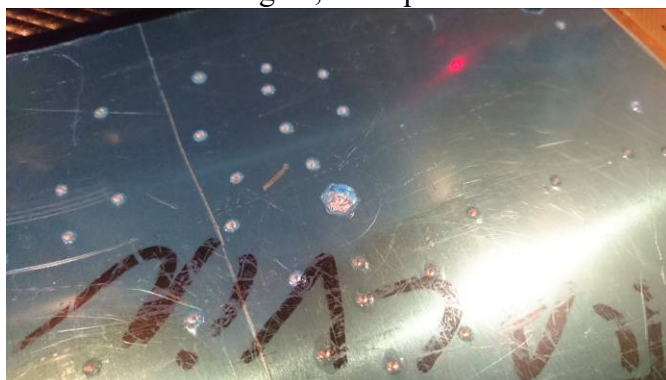
Após obtenção de resultados satisfatórios na impressão de polímero PLA, foi utilizado ABS para a impressão das peças da própria máquina, como tampas da seção frontal, duto de ventilação da peça e suporte do sensor de nivelamento.

4.6 USINAGEM

Como teste da capacidade de usinagem da máquina, para a reforma da estrutura e cabeamento da máquina, foi realizada uma tentativa de usinagem dos novos componentes em chapas de alumínio de 3 e 4 mm de espessura. Percebeu-se durante os testes que a rigidez da máquina, embora excelente para a impressão 3D, deixa a desejar na usinagem de alumínio. Mesmo com esta limitação, utilizando-se de velocidades consideravelmente baixas, foi possível a usinagem de duas cavidades hexagonais para fixação de porcas na nova chapa de flange da máquina (Figura 13).

Com as reduzidas velocidades e baixa remoção de material por passe, a furação de furos guia para a posterior furação manual destas mesmas chapas de alumínio foi satisfatória, com precisão excelente, muito superior à marcação manual.

Figura 13 – Resultados de usinagem, furos piloto e uma cavidade hexagonal.



Fonte: o autor

4.7 GRAVAÇÃO LASER

Devido à quantidade de tempo disponível ao fim do projeto e particularidades da gravação laser, a mesma não foi ainda testada. A necessidade de proteção contra radiação laser refletida e extração de gases provenientes da gravação inviabilizam testes rápidos da

funcionalidade, sendo um preparo maior, especialmente no ambiente doméstico, altamente necessário. Foi, porém, constatado o funcionamento do componente em si, sendo possível focalizar o laser a ponto de iniciar a queima de papel, papelão e assemelhados.

5. CONCLUSÃO

Como uma ferramenta de aprendizado, o projeto surpreendeu. Não somente o aprimoramento de técnicas de fabricação manuais, como um forte aprimoramento de conhecimentos de projeto mecânico. Cada falha encontrada durante o projeto, montagem e testes, exigiu a busca por conhecimento adicional, novamente tornando-se uma ferramenta de aprendizado. Valiosas lições foram aprendidas, algumas como o cabeamento da máquina sendo bons exemplos do que não se fazer em um projeto, enquanto outras soluções como as adotadas no flange de ferramentas podendo ser utilizados futuramente novamente em projetos variados. O cumprimento total dos requisitos foi atingido.

Com a conclusão da fase inicial do projeto, foi obtida, como esperado, uma ferramenta muito versátil de construção de projetos domésticos, sendo capaz de construir peças para si mesma. Inclusive fora do âmbito de projetos domésticos, a máquina conseguiu desempenhar satisfatoriamente, compensando o seu valor em trabalhos comerciais.

Como contribuição acadêmica adicional, a máquina tornou possíveis os testes de impressão de tinta expansível feitos para a tese de doutorado da Dra. Karen Mello Colpes (2023), devido ao flange de montagem de ferramentas, na qual foi possível, com facilidade, a adição de uma ferramenta nova, neste caso dois protótipos de extrusoras de tinta expansível do tipo Acripuff.

Contudo, como conhecido na comunidade *maker*, nenhum projeto está terminado. Como mencionado no texto, uma grande reforma na máquina está em progresso durante a escrita deste trabalho, na qual peças estruturais foram substituídas por versões mais precisas ou melhoradas em estrutura ou funcionalidade, controladores de motores foram substituídos por versões atualizadas dando maior velocidade aos eixos X e Y, fusos de passo 16 mm foram encontrados, o cabeamento foi refeito por completo, uma placa principal com maior capacidade de processamento foi substituída, entre outras melhoras.

Novas ferramentas também podem ser facilmente adicionadas à máquina, como por exemplo, uma lâmina de corte para *plotters*, sistemas *pick and place* entre outros

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COLPES, K.M., SILVA, R.P, JOKIAHO, K.J. **Cabeçote de extrusão para impressora de gráficos em alto-relevo: uma forma de otimizar a produção de materiais didáticos para cegos.** In: OLIVEIRA, G.G. de; NÚÑEZ, G.J.Z.; PASSOS, J. E.; Design em Pesquisa – Volume 5. Porto Alegre: Marcavisual, 2022 cap. 13, p. 179-193. E-book. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/iicd/publicacoes/livros>>.

Acesso em: 18 de Março de 2023

CRUMP, S. Scott. **APARATUS AND METHOD FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS.** Depositante: Statasys, Inc. US005121329. Depósito: 30 out. 1989. Conceção: 9 jun. 1992. Disponível em: <<https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/5121329>>. Acesso em: 18 de Março. 2023.

3DPVDB. **Foldie 3D FFF Printer.** UltiMaker Thingiverse, 2014. Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/thing:558317>>. Acesso em: 26 de Março de 2023.

EMMANUEL. **FoldaRap.** RepRap.org. Disponível em: <<https://reprap.org/wiki/FoldaRap>>. Acesso em: 23 de Março de 2023.

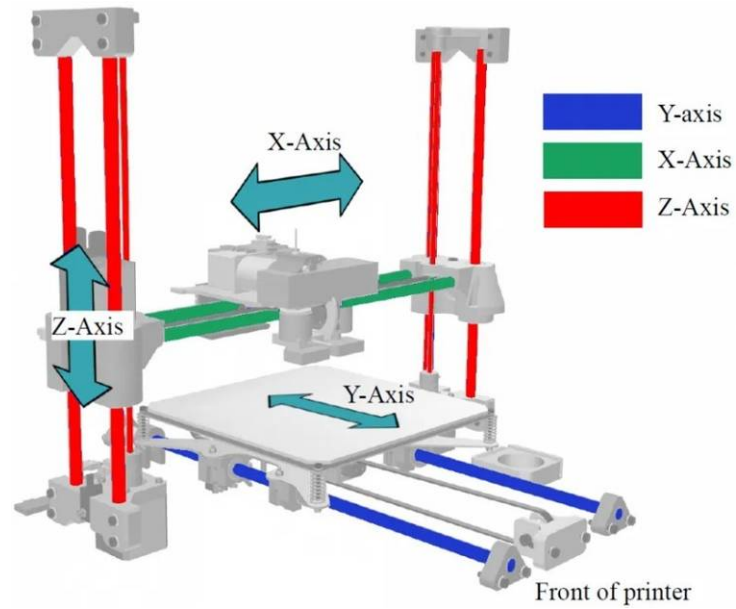
Original Prusa i3 MK3S+ 3D printer. Prusa Research by Joseph Prusa. Disponível em <<https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-3d-printer-3/>>. Acesso em 2 de Abril de 2023.

KKcare 500mw desktop DIY máquina de gravura a laser CNC gravador esculor impressora a laser com óculos de proteção para escultura corte e gravura. Amazon. Disponível em <https://www.amazon.com.br/KKcare-gravador-esculor-impressora-escultura/dp/B09XDQ4237/ref=asc_df_B09XDQ4237>. Acesso em 2 de Abril de 2023.

Cnc Robooster 3018 Pro 200w. Mercado Livre. Disponível em <<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2181095145-cnc-robooster-3018-pro-200w-JM>>. Acesso em 2 de Abril de 2023.

ANEXOS

Anexo 1

Figura 14 - Esquema de movimento “*bed slinger*”.

Fonte: <<https://top3dshop.com/blog/3d-printer-bed-types-and-calibration>>.

APÊNDICES

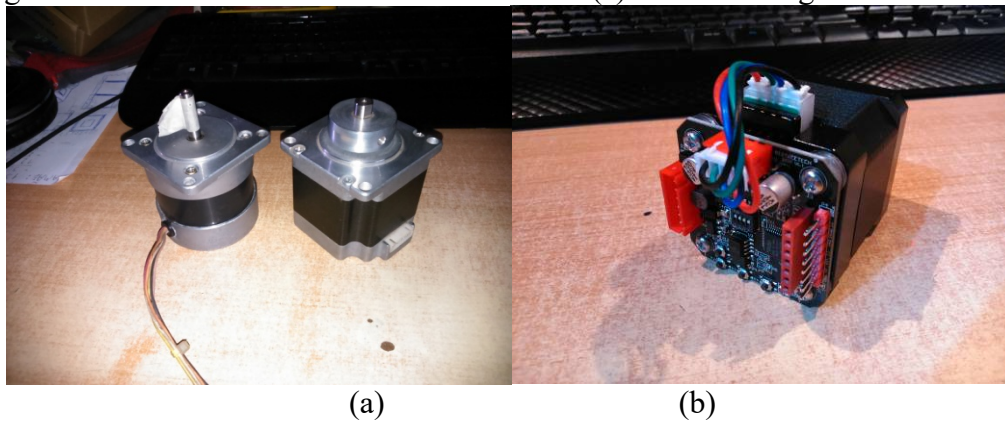
Apêndice 1

Figura 15 - Montagem V-Slot com parafuso interno e porcas específicas para o perfil em questão



Apêndice 2

Figura 16 a e b – Motores NEMA 23 utilizados (a) e motores Bigtreetech S42B (b)



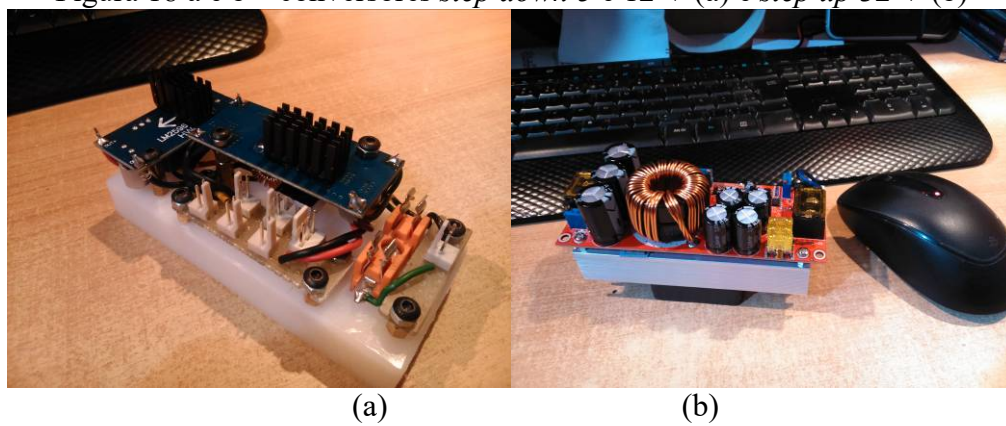
Apêndice 3

Figura 17 – Fonte de 24 V 15 A (acima) e fonte de 24 V 30 A (abaixo)



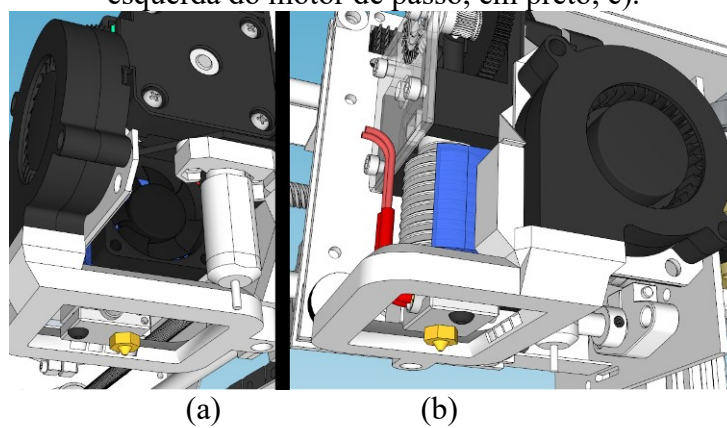
Apêndice 4

Figura 18 a e b – conversores *step down* 5 e 12 V (a) e *step up* 32 V (b)



Apêndice 5

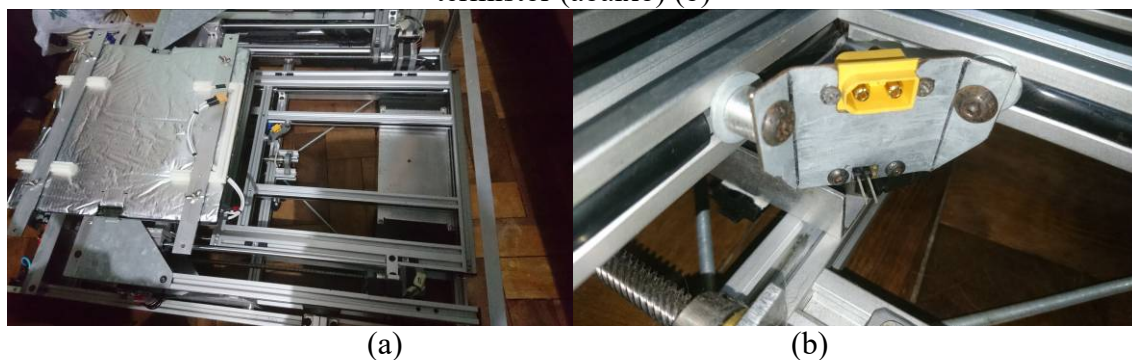
Figura 19 a, b e c – Ventilador 30 mm *hotend* (a), ventilador do tipo 5015 radial e duto direcionador para ventilação da peça (b), ventilador 80 mm para a seção eletrônica (abaixo, à esquerda do motor de passo, em preto, c).



(c)

Apêndice 6

Figura 20 a e b – Base móvel do eixo Y (a) e conectores de alta corrente (acima) e sinal de termistor (abaixo) (b)



Apêndice 7

Figura 21 – Servomotor (componente azul) com chave para compensação de nivelamento automática (componente preto e branco com detalhe em vermelho)



Apêndice 8

Figura 22 – Artefatos periódicos por vibração dos fusos

