



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Trabalho de Projeto

Desenvolvimento de uma Fresadora CNC de 3 Eixos

Rui Jorge Baião Janela

Orientador(es) | Fernando Manuel Janeiro

Évora 2023



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia Mecatrónica

Trabalho de Projeto

Desenvolvimento de uma Fresadora CNC de 3 Eixos

Rui Jorge Baião Janela

Orientador(es) | Fernando Manuel Janeiro

Évora 2023



O trabalho de projeto foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | João Manuel Figueiredo (Universidade de Évora)

Vogais | Fernando Manuel Janeiro (Universidade de Évora) (Orientador)
J.M.G. Marques (Universidade de Évora) (Arguente)

Agradecimentos

Este agradecimento destina-se a todos os que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho de projeto, e a todos os que contribuíram para o meu percurso académico.

A todos os meus colegas e amigos, um agradecimento pela constante partilha de conhecimento, e pelo interesse demonstrado no meu projeto.

Também gostaria de agradecer ao Professor Fernando Janeiro, meu orientador, pela partilha de conhecimento e críticas construtivas que contribuíram para o resultado final deste trabalho.

Aos meus avós, irmã, sobrinhos e restante família agradeço a confiança em mim depositada e por me motivarem a dar o meu melhor.

À minha namorada, um especial obrigado pela compreensão e apoio numa fase tão preenchida da minha vida.

O maior agradecimento vai para os meus pais, aos quais agradeço todos os valores transmitidos e o apoio ao longo destes anos, que me permitiu sempre explorar as minhas capacidades e evoluir a nível pessoal, académico e profissional.

Resumo

Desenvolvimento de uma Fresadora CNC de 3 Eixos

Atualmente, nas indústrias, uma das ferramentas mais utilizadas pelas equipas de engenharia são as impressoras 3D, que permitem a construção de peças ou modelos de teste de uma forma rápida, e automática, permitindo às equipas terem uma maior produtividade e performance. O problema deste processo, embora cada vez existam materiais de maior resistência, continua a ser a falta de capacidade mecânica quando comparados aos componentes metálicos ou alguns plásticos maquinados.

Devido ao elevado custo das máquinas de CNC industriais (50 000 € a 300 000 €), grande parte das empresas acabam por não possuir uma e ter vários processos de maquinação bastante manuais, e mais demorados. O objetivo deste projeto foca-se na criação de uma CNC de 3 eixos, com uma dimensão reduzida, que permita às equipas de engenharia, a pessoas individuais ou a pequenas empresas, ter a capacidade de maquinar peças de metais macios ou plásticos mais resistentes a partir de um equipamento com um custo semelhante ao de algumas impressoras 3D.

Palavras Chave — CNC, Fresagem, Maquinação, Arduino, GRBL

Abstract

Development of a 3 Axis CNC Milling Machine

Currently, in industry, one of the most used tools by engineering teams are 3D printers, which allow the construction of parts or test models in a fast and automatic way, enabling teams to have higher productivity and performance. The problem with this process, even though there are increasingly stronger materials available, remains the lack of mechanical capacity when compared to machined metal components or some plastics.

Due to the high cost of industrial CNC machines (€ 50,000 to € 300,000), a significant number of companies end up not having one and resort to various manual and time-consuming machining processes. The objective of this project focuses on creating a 3-axis CNC, with a reduced size, that allows engineering teams, individuals, or small businesses to have the capability of machining soft metal parts or more resilient plastics with an equipment with a similar cost to some 3D printers.

Keywords— CNC, Milling, Machining, Arduino, GRBL

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Estrutura	1
2	Estado de Arte	3
2.1	Fresagem	3
2.2	CNC - Computerized Numerical Control	5
2.2.1	G-code	6
2.3	Fresadoras CNC	8
2.4	Opções no Mercado	9
	Fresadora CNC Vertical	9
	Fresadora CNC Horizontal	10
	Fresadora CNC de Pórtico	11
	Fresadora CNC de 5 Eixos	12
	Fresadora CNC Desktop	13
3	Desenvolvimento da CNC	15
3.1	Ideia Inicial	15
	Parte Mecânica	15
	Parte Elétrica	15
3.2	Hardware Mecânico	16
3.2.1	Modelação 3D	16
	Eixo Y	16
	Eixo X	19
	Eixo Z	22
3.2.2	Impressão 3D dos Componentes	25
	Impressora 3D FDM	26
	Filamento Utilizado	26
	Componentes Impressos	27
3.2.3	Nema 17	29
	Motores de Passo	29
3.2.4	Fuso Trapezoidal T8	32
3.2.5	Chumaceiras	33
3.2.6	Acoplamento Rígido 5-8	33
3.2.7	HGH15CA	34
3.2.8	MGN12H	35
3.2.9	HSR15	36
3.2.10	Makita RT0702C	37
3.3	Hardware Elétrico	38
3.3.1	Circuito Elétrico	38
3.3.2	Fonte de Alimentação	39
3.3.3	Arduino Uno Rev3	40
3.3.4	CNC Shield	41
	Alimentação	41
	Replicar Eixo	41
3.3.5	Controlador DRV8825	42

Configurar Micro-passos dos Motores	43
Ajuste de Corrente Máxima do DRV8825	44
3.4 Custo Total do Sistema	45
4 Análise do Software/Firmware	47
4.1 GRBL	47
4.1.1 Instalação do Firmware	48
4.2 UGS - Universal Gcode Sender	50
4.2.1 Instalação do Software	50
4.2.2 Setup da CNC	51
4.2.3 Utilização do Programa	53
5 Testes e Resultados	57
5.1 Fusion 360 CAM	57
5.2 Testes Realizados e Resultados Obtidos	58
5.2.1 Teste de dimensões	58
5.2.2 Teste de Maquinação em Nylon	59
5.2.3 Teste de Maquinação em Alumínio	61
6 Conclusões e Melhorias Futuras	63
6.1 Conclusões	63
6.2 Melhorias Futuras	63
A Desenhos Técnicos	67

Lista de Figuras

1.1	Cronograma do Trabalho de Projeto	2
2.1	Fresadora Vertical [1] [2]	3
2.2	Fresagem Cilíndrica [3]	4
2.3	Fresagem Frontal [3]	4
2.4	Desenho Apresentado na Patente da primeira CNC [4]	5
2.5	G-code de quadrado de 10x10 mm	6
2.6	G-codes [5]	6
2.7	M-codes [5]	7
2.8	Fresadora CNC em Funcionamento [6]	8
2.9	Fresadora CNC Haas Automation [7]	8
2.10	Fresadora CNC Vertical [7]	9
2.11	Fresadora CNC Horizontal [7]	10
2.12	Fresadora CNC de Pórtico [7]	11
2.13	Fresadora CNC de 5 eixos [7]	12
2.14	Fresadora CNC Desktop [7]	13
3.1	Montagem das Guias lineares Y na Estrutura	16
3.2	Encaixes de perfis de Alumínio	16
3.3	Pés Flexíveis	17
3.4	Torre Eixo Y	17
3.5	Suporte de Motor Y	18
3.6	Suporte de Chumaceira Y	18
3.7	Sistema Eixo Y	18
3.8	Pórtico do eixo X	19
3.9	Guias Lineares Eixo X	19
3.10	Suporte do Eixo Z	20
3.11	Suporte do Motor X	20
3.12	Acoplamento do Motor X ao Fuso	20
3.13	Chumaceira do eixo X	21
3.14	Sistema Eixo X	21
3.15	Guia Linear Z	22
3.16	Suporte da Fresadora	22
3.17	Encaixe de Porca do Fuso	23
3.18	Acoplamento do Motor Z ao Fuso	23
3.19	Chumaceira do Eixo Z	23
3.20	CNC Model Isometric View	24
3.21	CNC Após Montagem	24
3.22	Ender 3 V2 [8]	25
3.23	Print Settings	27
3.24	Suporte Motor X Ultimaker Cura	27
3.25	Motor de Passo de Íman Permanente [9]	29
3.26	Motor de Passo de Relutância Variável [9]	29
3.27	Motor de Passo Híbrido [9]	30
3.28	Nema 17 59Ncm [10]	30
3.29	Desenho Frente Nema 17 [10]	31
3.30	Binário Vs Velocidade do Motor [11]	31

3.31	Desenho Lateral Nema 17 [10]	32
3.32	Fuso Trapezoidal T8	32
3.33	Desenho de Fuso e Porca Trapezoidal	33
3.34	Chumaceiras Utilizadas no Projeto	33
3.35	Acoplamento Rígido	33
3.36	Sistema de Funcionamento do carrinho HGH15CA [12]	34
3.37	Dados Técnicos da Guia HGH15CA [12]	34
3.38	Sistema de Funcionamento dos carrinhos MGN12H [12]	35
3.39	Dados Técnicos da Guia MGN12H [12]	35
3.40	Sistema de Funcionamento da Guia HSR15 [13]	36
3.41	Dados Técnicos da Guia HSR15 [13]	36
3.42	Makita RT0702C [14]	37
3.43	Circuito Elétrico CNC	38
3.44	Fonte de Tensão	39
3.45	Arduino Uno Rev3 [15]	40
3.46	CNC Shield [16]	41
3.47	Replicar Eixo Y [16]	41
3.48	DRV8825 [17]	42
3.49	Tabela de Micro-Passos [17]	43
3.50	Jumpers CNC Shield	43
3.51	Potenciômetro DRV8825	44
3.52	Equação Corrente DRV8825	44
3.53	Ajuste de Corrente Máxima	44
4.1	ATmega328 Arduino Uno Rev3 [15]	47
4.2	Download grbl	48
4.3	Adicionar Biblioteca grbl	49
4.4	Upload do Firmware no Arduino	49
4.5	Ecrã Principal do UGS	50
4.6	Conexão da CNC ao UGS	51
4.7	Sentidos de Rotação dos Motores	51
4.8	Calibração do Passo dos Motores	52
4.9	Calibração de Passo Experimentalmente	52
4.10	Controlo Manual CNC	53
4.11	Posição Atual CNC	53
4.12	Posição Zero	54
4.13	Code Viewer/Editor UGS	54
4.14	Visualizer UGS	55
5.1	Teste Inicial de Dimensões	58
5.2	Modelo 3D e Bloco de Nylon Inicial	59
5.3	Teste de Maquinação em Nylon	59
5.4	Peça Maquinada na CNC Vs Peça Original	60
5.5	Teste de Maquinação em Alumínio	61
5.6	Resultado da Maquinação	61

Lista de Tabelas

2.1	Fresadoras CNC Verticais Haas Automation	9
2.2	Fresadoras CNC Horizontais Haas Automation	10
2.3	Fresadoras CNC de Pórtico Haas Automation	11
2.4	Fresadoras CNC de 5 Eixos	12
3.1	Características Técnicas da Creality Ender 3 V2 [8]	26
3.2	Características PLA Galaxy Black [18]	26
3.3	Informação sobre Componentes Impressos	28
3.4	Características Técnicas do Arduino Uno Rev3	40
3.5	Custos Itens em Stock	45
3.6	Custo total do Sistema	45
5.1	Dimensões do Componente	60

Acrónimos e Siglas

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
DIY	Do It Yourself
EIA	Eletronics Industry Association
FDM	Fused Deposition Modeling
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GND	Ground
GPIO	General Purpose Input/Output
LED	Light-emitting Diode
MCU	Microcontroller Unit
NCK	Numerical Control Kernel
PLA	Polylactic Acid
POM	Polióxido de Metileno
PWM	Pulse Width Modulation
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
TPU	Thermoplastic Polyurethane
UGS	Universal Gcode Sender
USB	Universal Serial Bus

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

As máquinas controladas numericamente por computador, ou máquinas CNC, são bastante versáteis e permitem a produção de diferentes sistemas com diversas aplicações. Desde impressão 3D, aplicações de pick and place e aplicações de fresagem em metais, madeiras e plásticos. As máquinas CNC dominam a indústria de produção em massa devido à sua automação, precisão e fiabilidade.

Ao longo dos últimos anos a impressão 3D teve uma evolução incrível que permitiu reduzir bastante o preço destas máquinas e aumentar a sua capacidade, precisão e qualidade geral de impressão. Ao contrário destas máquinas, onde existem várias marcas com boas opções com um equilíbrio entre qualidade preço no mercado, as máquinas CNC ainda são apenas utilizadas em oficinas especializadas em maquinação e em indústrias grandes, tendo por norma um custo associado bastante elevado. Os preços elevados e grandes dimensões da maioria das fresadoras de CNC no mercado, como é discutido na secção 2.4, não permitem que este tipo de equipamentos seja utilizado por toda a gente com necessidade de trabalhar nesta área.

1.2 Objetivos

O objetivo deste projeto concentra-se no desenvolvimento de uma fresadora CNC de 3 eixos que responda à necessidade cada vez maior das equipas de engenharia, pessoas individuais ou pequenas empresas, terem a capacidade de maquinar peças a partir de um equipamento de dimensões reduzidas e com um custo semelhante ao de algumas impressoras 3D.

É importante a CNC ter a capacidade de maquinar materiais como o POM e o Nylon, muito utilizados na indústria, mas que também possa ser utilizada para maquinar algumas peças de metais macios como o alumínio e o cobre. Desta forma, após o desenvolvimento da CNC vão ser realizados testes em diferentes materiais.

1.3 Estrutura

A nível estrutural, o presente trabalho de projeto está dividido em seis capítulos que foram organizados seguindo a ordem mais lógica, apresentada na figura 1.1 do cronograma inicial do projeto, de forma a tornar mais fácil a leitura e compreensão do tema.

O Trabalho está então dividido nos seguintes Capítulos:

- **Capítulo 1.** No presente Capítulo é feita uma introdução ao tema do Projeto bem como um pequeno resumo do que vai ser apresentado em cada capítulo ao longo do texto.
- **Capítulo 2.** No segundo Capítulo é feito um breve enquadramento ao tema, e apresentado o estado de arte das Fresadoras CNC e algumas das opções existentes no mercado.
- **Capítulo 3.** No terceiro Capítulo é apresentado detalhadamente o desenvolvimento técnico da componente mecânica e elétrica da CNC, bem como todos os componentes utilizados e ajustes necessários. É também apresentado o custo final do desenvolvimento desta CNC.

- **Capítulo 4.** No quarto Capítulo são analisados os softwares/firmwares utilizados no sistema e é explicado o método de instalação e funcionamento dos mesmos.
- **Capítulo 5.** No quinto Capítulo são apresentados os testes realizados com a CNC após a finalização do projeto e discutidos os resultados obtidos.
- **Capítulo 6.** No sexto Capítulo são apresentadas as conclusões relativamente ao projeto, onde é avaliado o trabalho desenvolvido, e são apresentadas algumas possíveis melhorias futuras para este projeto.

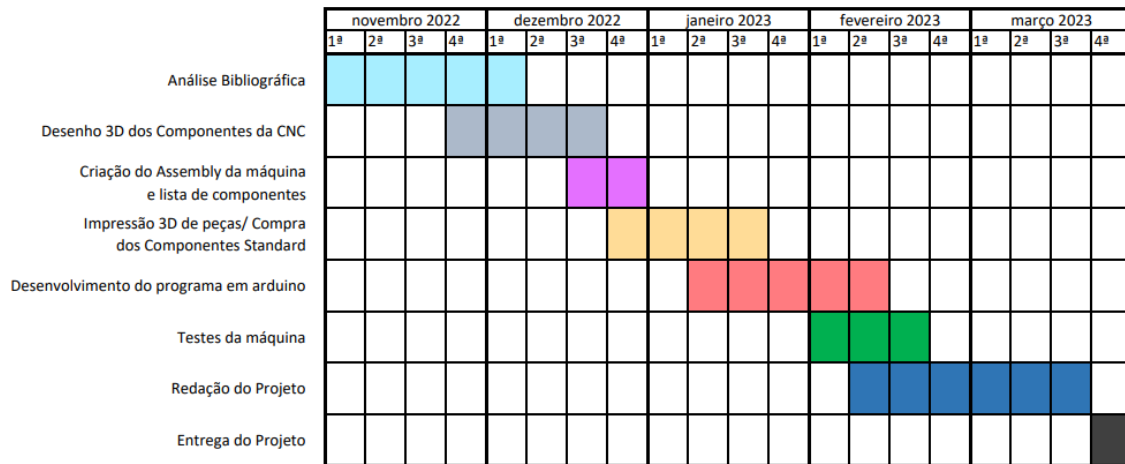


Figura 1.1: Cronograma do Trabalho de Projeto

Capítulo 2

Estado de Arte

2.1 Fresagem

A fresagem é um processo de maquinação mecânica, realizado por meio de uma ferramenta de corte rotativa de secção circular munida de arestas cortantes na sua periferia que é designada por fresa. O processo consiste em retirar o excesso de material da superfície de uma peça a fim de lhe conferir a forma e o acabamento desejado [1].

Durante a fresagem, a remoção de material da peça é alcançada a partir da combinação de dois movimentos simultâneos. O primeiro consiste na rotação da fresa, e este é conhecido como o movimento de corte. O segundo movimento é o relativo entre a peça e a ferramenta, que na maioria das vezes, é controlado pela mesa da máquina onde é fixada a peça a ser trabalhada. No entanto, é importante notar que existem exceções, como é o caso das fresadoras de mesa apoiada, nas quais a mesa permanece imóvel enquanto a ferramenta executa todos os movimentos [1]. Esta última versão é a mais semelhante com a máquina desenvolvida neste projeto.



Figura 2.1: Fresadora Vertical [1] [2]

Em trabalhos de fresagem, a fresa pode atuar principalmente por 2 tipos de processos:

- Fresagem Cilíndrica - Nesta fresagem o eixo da fresa é paralela à superfície que queremos maquinar. Como as lâminas da fresa atacam o material de forma intermitente este tipo de fresagem por vezes deixa as peças com uma superfície ondulada. Sendo este processo mais rápido, pois a área de corte lateral da fresa é superior à frontal, por vezes é utilizado para remover a maior parte do material, sendo depois utilizada a fresagem frontal para o acabamento da superfície.



Figura 2.2: Fresagem Cilíndrica [3]

- Fresagem Frontal - Na fresagem frontal o eixo da fresa é perpendicular à superfície a maquinar. Como a fresa possui lâminas tanto na lateral como na superfície inferior, neste tipo de fresagem o acabamento das superfícies maquinadas ficam sem ondulações. Este processo é no entanto mais demorado, e é por isso usado normalmente em superfícies em que é necessário ter um bom acabamento.

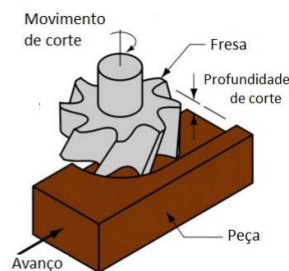


Figura 2.3: Fresagem Frontal [3]

Nos últimos anos, a tecnologia nas fresadoras mecânicas evoluiu significativamente, com o desenvolvimento de novos materiais para as ferramentas de corte e a utilização de softwares de CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing) para programar os processos de fresagem em máquinas CNC. Um exemplo de software de CAM é o Fusion 360 CAM que será utilizado neste projeto e que oferece uma grande variedade de ferramentas para programação de processos de fresagem, permitindo maior eficiência e produtividade na indústria.

2.2 CNC - Computerized Numerical Control

O Controlo Numérico Computorizado (CNC) baseia-se num sistema controlado por computador, que controla o movimento de máquinas, como fresadoras, tornos, retificadoras, impressoras 3D, máquinas de gravação a laser entre outras. Envolve o uso de instruções codificadas, que são geralmente geradas através de software de desenho assistido por computador (CAD/CAM) e depois traduzidas pelo controlador CNC em ações físicas, como o movimento da ferramenta ou da peça.

O início desta tecnologia remonta à década de 1940, durante a Segunda Guerra Mundial, quando a necessidade de produzir componentes complexos com alta precisão para aviões e outras máquinas militares era elevada. As máquinas convencionais não conseguiam produzir peças complexas com precisão e rapidez suficientes para atender às necessidades, então como resultado, o governo dos EUA financiou o desenvolvimento de uma nova tecnologia que combinava a precisão das máquinas atuais com a velocidade da eletrónica.

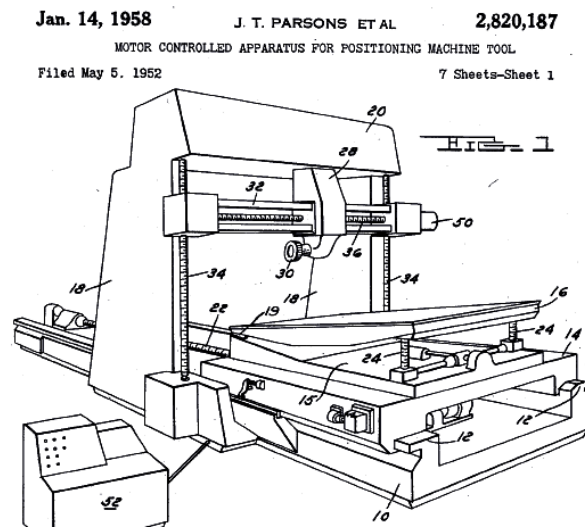


Figura 2.4: Desenho Apresentado na Patente da primeira CNC [4]

O primeiro protótipo de uma CNC foi desenvolvido na década de 1950 por John Parsons e Frank Stulen no laboratório de servomecanismos do MIT [4]. O sistema era baseado em uma máquina-ferramenta convencional equipada com componentes eletrónicos e hidráulicos para controlar o movimento da ferramenta. Na figura 2.4 é apresentado o desenho incluído na patente da CNC preenchida por John Parsons em 1958. Em 1952, a primeira fresadora CNC foi instalada na fábrica da Ingersoll Milling Machine Company em Rockford, Illinois.

A tecnologia CNC evoluiu rapidamente nas décadas seguintes, com o desenvolvimento de novos sistemas de controlo, software de programação e máquinas mais sofisticadas. Hoje, o CNC é amplamente utilizado em indústrias automotivas, aeroespaciais, de produtos eletrónicos, entre outras, permitindo a produção eficiente e precisa de peças complexas com alta rapidez, repetibilidade e sem a inclusão do erro humano.

O controlo de uma máquina CNC, atualmente, é feito pelo NCK (Numerical Control Kernel), que pode ser implementado num FPGA (Field-Programmable Gate Array) ou num MCU (Microcontroller Unit), sendo que a última opção é a mais comum.

O NCK traduz as instruções fornecidas ao microcontrolador em ações físicas, como o movimento dos motores ou as ativações da ferramenta da máquina. Essas instruções são dadas em G-code, e podem ser escritas manualmente ou geradas por um software de fabricação assistida por computador (CAM) e enviadas para o NCK.

2.2.1 G-code

O G-code é uma linguagem de programação utilizada em máquinas CNC para controlar as suas trajetórias, a velocidade dos movimentos conhecida como o avanço da máquina, e ativar outras configurações específicas da máquina. Esta linguagem foi definida na década de 1960 pela Eletronics Industry Association (EIA) com o nome RS-274D, no entanto a linguagem é geralmente conhecida como G-code ou GM Code porque grande parte dos comandos deste tipo de programação começam com estas duas letras, como vamos verificar de seguida.

O G-code foi desenvolvido numa altura em que os controladores das máquinas tinham uma memória bastante reduzida, desta forma a linguagem foi projetada para ser o mais compacta e simples possível [5]. Os comandos G-code podem ser escritos em um arquivo de texto simples, como foi feito para o exemplo da figura 2.5 que iria maquinar um quadrado de 10x10 mm com 2 mm de profundidade, ou podem ser gerados a partir de softwares CAM (Computer-Aided Manufacturing) como o Fusion 360 CAM, para fresadoras CNC, ou de slicers como o Ultimaker Cura e o PrusaSlicer, para impressoras 3D. Esses softwares permitem que os utilizadores convertam automaticamente o modelo 3D, depois de seleccionadas algumas opções, em um ficheiro G-code para ser executado na máquina CNC. O Fusion 360 CAM foi utilizado neste projeto, para testar a CNC, e vai ser abordado na secção 5.1.

```
G10 P0 L20 X0 Y0 Z0
G21
G90
G17 G40 G49
F200
G1 X 0 Y 0 Z 2
G1 X 0 Y 10 Z 2
G1 X 10 Y 10 Z 2
G1 X 10 Y 0 Z 2
G1 X 0 Y 0 Z 2
G0 X 0 Y 0 Z -30
M2
```

Figura 2.5: G-code de quadrado de 10x10 mm

Nesta linguagem, as linhas de código que começam com G são chamadas de *Preparatory Words*, isto porque preparam a máquina para determinados tipos de movimento ou para determinadas condições.

Na figura 2.6 são apresentados alguns dos códigos preparatórios mais comuns. É importante notar que os códigos de controlo da máquina são diretamente dependentes do hardware da CNC, desta forma alguns dos códigos existentes podem apenas funcionar em determinadas máquinas.

Code	Meaning
G0	Rapid motion. Used to position the machine for non-milling moves.
G1	Line motion at a specified feed rate.
G2	Clockwise arc.
G3	Counterclockwise arc.
G4	Dwell.
G28	Return to machine home position.
G40	Cutter Diameter Compensation (CDC) off.
G41	Cutter Diameter Compensation (CDC) left.
G42	Cutter Diameter Compensation (CDC) right.
G43	Tool length offset (TLO).
G54	Fixture Offset #1.
G55	Fixture Offset #2.
G56	Fixture Offset #3.
G57	Fixture Offset #4.
G58	Fixture Offset #5.
G59	Fixture Offset #6.
G80	Cancel drill cycle.
G81	Simple drill cycle.
G82	Simple drill cycle with dwell.
G83	Peck drill cycle.
G84	Tap cycle.
G90	Absolute coordinate programming mode.
G91	Incremental coordinate programming mode.
G98	Drill cycle return to Initial point (R).
G99	Drill cycle return to Reference plane (last Z Height)

Figura 2.6: G-codes [5]

Estes tipos de códigos, que permitem controlar o movimento da ferramenta de corte, são os mais utilizados num programa de uma CNC, como se pode observar na figura 2.5.

Também é comum a utilização de M-codes, chamados de *Miscellaneous Words*, estes permitem o controlo de opções extra como a refrigeração, o sentido de rotação da ferramenta entre outras opções. Em máquinas mais simples, como é o caso da máquina desenvolvida neste projeto, grande parte destes códigos não são utilizados. Na figura 2.7 são apresentados os M-codes mais comuns.

Code	Meaning
M0	Program stop. Press Cycle Start button to continue.
M1	Optional stop. Only executed if Op Stop switch on the CNC control is turned ON.
M2	End of program.
M3	Spindle on Clockwise.
M4	Spindle on Counterclockwise.
M5	Spindle stop.
M6	Change tool.
M8	Coolant on.
M9	Coolant off.
M30	End program and press Cycle Start to run it again.

Figura 2.7: M-codes [5]

Note-se que esta linguagem de programação tem várias alternativas e tipos de código diferentes, que não são referidos neste projeto mas podem ser consultados em [5].

2.3 Fresadoras CNC

As fresadoras CNC são máquinas controladas por computador capazes de realizar uma ampla gama de operações de fresagem, como corte, perfuração e maquinação de diversos materiais. A principal vantagem dessas máquinas é a capacidade de produzir peças com precisão elevada precisão, repetibilidade e velocidade, superando em muito as limitações das fresadoras convencionais.

Ao contrário das fresadoras convencionais, que exigem intervenção manual para ajustar as configurações de corte e a posição da ferramenta, as fresadoras CNC operam por meio de instruções programadas no computador, que controlam os movimentos da máquina e a posição exata da ferramenta de corte. Essas instruções, em formato G-code como foi discutido na seção 2.2.1, são inseridas no software de controlo da máquina, que por sua vez, interpreta os comandos e os traduz em movimentos nos eixos X, Y e Z da máquina ou até mesmo em mais eixos simultaneamente, como o quarto eixo rotativo A ou o quinto eixo basculante B. Essa flexibilidade de movimento oferece muitas possibilidades de fresagem, permitindo a criação de peças com geometrias complexas como a apresentada na figura 2.8, reduzindo erros humanos e aumentando a eficiência do processo.

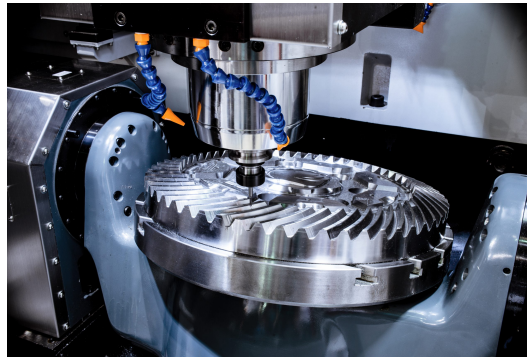


Figura 2.8: Fresadora CNC em Funcionamento [6]

Além da precisão e da automação no fabrico de peças, as fresadoras CNC também oferecem flexibilidade na produção. Com a capacidade de alterar rapidamente as configurações de corte e a geometria das peças, as empresas podem responder com agilidade aos pedidos do mercado e personalizar os produtos de acordo com as necessidades específicas dos clientes.

Apesar de todos os pontos positivos destas máquinas, a utilização de fresadoras CNC ainda não é uma realidade para muitas empresas. O alto custo de investimento inicial para uma fresadora CNC como a da figura 2.9, que custa mais de 250000 €, é a principal razão para isto não acontecer. É de notar, no entanto, que o retorno de um investimento deste tipo pode ser significativo em termos de eficiência produtiva, qualidade do produto e competitividade no mercado, e desta forma uma procura por máquinas deste tipo com um menor custo é cada vez maior.



Figura 2.9: Fresadora CNC Haas Automation [7]

2.4 Opções no Mercado

Existem várias vertentes de fresadoras CNC no mercado, que foram desenvolvidas para diferentes aplicações, variando principalmente em tamanho, orientação do eixo da ferramenta de corte ou pelo número de eixos diferentes. Algumas das opções que existem ao dia de hoje são apresentadas de seguida utilizando exemplos de máquinas do fabricante Haas Automation [7].

Fresadora CNC Vertical

Neste tipo de fresadora, o eixo de fixação da ferramenta está orientado verticalmente, como se pode observar na figura 2.10, e são principalmente utilizadas para fresar superfícies planas, cavidades, fazer cortes verticais e acabamentos de superfície.

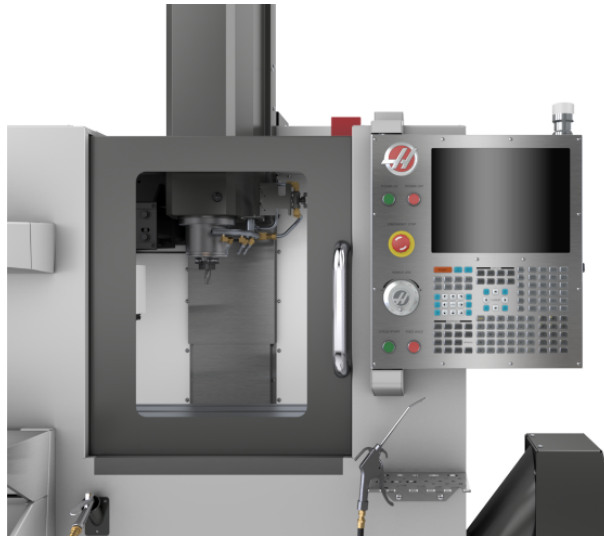


Figura 2.10: Fresadora CNC Vertical [7]

Estas máquinas possuem uma mesa de trabalho plana onde a peça a ser maquinada é fixada. A ferramenta de corte é depois montada em um cabeçote que se move ao longo dos 3 eixos principais X (horizontal), Y (vertical) e Z (profundidade). Note-se que por vezes estes movimentos são efetuados pela mesa onde a peça está fixa e não pela ferramenta de corte.

O custo de uma fresadora CNC vertical pode variar significativamente, dependendo de vários fatores, como o tamanho da máquina, suas capacidades, qualidade da construção e marca do fabricante. Na tabela 2.1 são apresentados alguns modelos de fresadoras cnc verticais do fabricante Haas Automation e o preço mínimo desses modelos, sendo que existem varias opções extra que aumentam o custo dos modelos.

Modelo	Fabricante	Eixos	Área de Trabalho	Preço
Mini Mill	Haas Automation	3	406 x 305 x 254 mm	33.995 €
Super Mini Mill	Haas Automation	3	508 x 406 x 356 mm	43.095 €
CM-1	Haas Automation	3	305 x 254 x 356 mm	57.395 €
VF-1	Haas Automation	3	508 x 406 x 508 mm	49.295 €
VF-3	Haas Automation	3	1016 x 508 x 635 mm	65.395 €
VF-6/40	Haas Automation	3	1626 x 813 x 762 mm	122.795 €

Tabela 2.1: Fresadoras CNC Verticais Haas Automation

Fresadora CNC Horizontal

Nas fresadoras CNC horizontais o eixo da ferramenta de corte está posicionado horizontalmente, e trabalha as peças nesta orientação. Estas fresadoras são menos utilizadas que as verticais em oficinas de maquinação convencionais, sendo a sua principal aplicação a fresagem de peças grandes e pesadas que são posicionadas horizontalmente na mesa de trabalho, tendo estas máquinas uma área de trabalho superior.



Figura 2.11: Fresadora CNC Horizontal [7]

Tal como na fresadora vertical, a ferramenta de corte é montada num cabeçote que por sua vez se move ao longo de três eixos principais X (horizontal), Y (vertical) e Z (profundidade). Sendo que em algumas máquinas a peça a ser maquinada é que realiza parte dos movimentos.

O custo destas máquinas varia bastante consoante a área de trabalho, a sua capacidade, a inovação entre outras características. Sendo estas máquinas tipicamente maiores que as fresadoras cnc verticais, o seu custo é também significativamente maior. Na tabela 2.2 são apresentados alguns modelos de fresadoras cnc horizontais do fabricante Haas Automation e o preço mínimo desses modelos.

Modelo	Fabricante	Eixos	Área de Trabalho	Preço
EC-400	Haas Automation	3	559 x 635 x 559 mm	182.695 €
EC-500	Haas Automation	3	813 x 635 x 711 mm	210.495 €
EC-630	Haas Automation	3	1016 x 940 x 1016 mm	304.395 €
EC-1600	Haas Automation	3	1626 x 1270 x 813 mm	219.195 €
EC-1600ZT-5AX	Haas Automation	5	1626 x 1270 x 1016 mm	346.995 €

Tabela 2.2: Fresadoras CNC Horizontais Haas Automation

Fresadora CNC de Pórtico

Estas fresadoras têm uma estrutura de pórtico que movimenta a ferramenta em cima da mesa de trabalho. A mesa de trabalho é posicionada entre o pórtico, como se pode observar na figura 2.12, e a ferramenta de corte é montada em um cabeçote que se move ao longo de três eixos principais X (longitudinal), Y (transversal) e Z (vertical) enquanto a peça a maquinar se encontra fixa na mesa.

Este tipo de configuração permite trabalhar com peças de grandes dimensões, como chapas metálicas, placas de madeira, entre outros materiais, e é bastante utilizada na indústria de moldes e matrizes.



Figura 2.12: Fresadora CNC de Pórtico [7]

Essas máquinas são principalmente utilizadas em setores industriais que requerem o processamento de peças volumosas, como a indústria de construção naval, indústria aeroespacial, indústria automóvel e fabricação de componentes estruturais. Este tipo de máquinas oferecem alta precisão, rigidez e capacidade de produção, permitindo a fabricação eficiente de peças complexas.

Modelo	Fabricante	Eixos	Área de Trabalho	Preço
GR-510	Haas Automation	3	3073 x 1549 x 279 mm	125.395 €
GR-712	Haas Automation	3	3683 x 2159 x 279 mm	164.895 €
GM-2	Haas Automation	3	3683 x 2223 x 559 mm	197.095 €
GM-2-5AX	Haas Automation	5	3683 x 2223 x 1016 mm	358.295 €

Tabela 2.3: Fresadoras CNC de Pórtico Haas Automation

Como é possível observar na tabela 2.3, este tipo de fresadoras têm uma área de trabalho superior às restantes sem que o seu custo seja proporcional ao aumento da mesma. Isto deve-se à diferente tecnologia que é aplicada na fresadora, que permite maquinar peças de grande dimensão, aumentando a mesa de trabalho e consecutivamente o curso do pórtico, sem um aumento muito significativo no custo.

Fresadora CNC de 5 Eixos

Uma fresadora CNC de 5 eixos é uma máquina de controlo numérico por computador (CNC) que possui a capacidade de realizar operações de fresagem em cinco eixos diferentes. Ao contrário da grande maioria das fresadoras CNC, que operam nos três eixos X, Y e Z, as fresadoras de 5 eixos, para além destes, têm também movimentos rotativos em torno dos eixos A e B.

Esta variação permite a maquinação de peças complexas com várias direções e ângulos que seriam inacessíveis utilizando uma fresadora de 3 eixos.

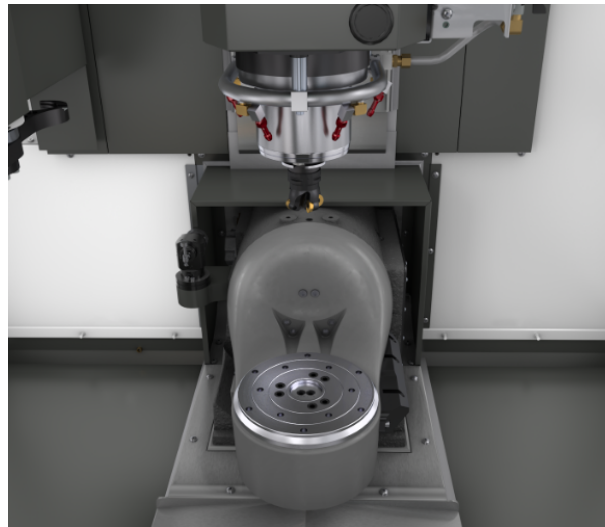


Figura 2.13: Fresadora CNC de 5 eixos [7]

Os dois eixos de rotação A e B, que por norma controlam a rotação e inclinação da peça a ser maquinada, permitem que a ferramenta de corte seja posicionada em diferentes ângulos em relação à peça, oferecendo maior flexibilidade e capacidade às máquinas, como a fresagem de superfícies curvas. A facilidade da rotação da peça permite também que várias peças sejam maquinadas de uma vez, sem necessidade de parar durante o processo para rodar e fixar novamente a peça manualmente.

Modelo	Fabricante	Eixos	Área de Trabalho	Preço
UMC-350HD	Haas Automation	5	381 x 356 x 305 mm	99.995 €
UMC-500	Haas Automation	5	610 x 406 x 406 mm	116.495 €
UMC-750	Haas Automation	5	762 x 508 x 508 mm	143.295 €
UMC-1000	Haas Automation	5	1016 x 635 x 635 mm	188.095 €
UMC-1250	Haas Automation	5	1270 x 762 x 711 mm	232.895 €

Tabela 2.4: Fresadoras CNC de 5 Eixos

Fresadora CNC Desktop

Uma fresadora CNC Desktop é uma máquina concebida para realizar operações de fresagem num formato compacto e adequado para ser utilizada em espaços de trabalho mais reduzidos, como oficinas ou laboratórios. Tal como foi referido no capítulo 1, a fresadora CNC que se pretende desenvolver neste projeto encaixa nesta categoria, sendo o principal foco a criação de uma CNC de dimensões e custo reduzido para ser utilizada em laboratórios, oficinas e empresas de pequenas dimensões.

As fresadoras CNC Desktop são geralmente utilizadas para trabalhar com materiais macios como madeira, plástico, alumínio e outros metais não ferrosos.

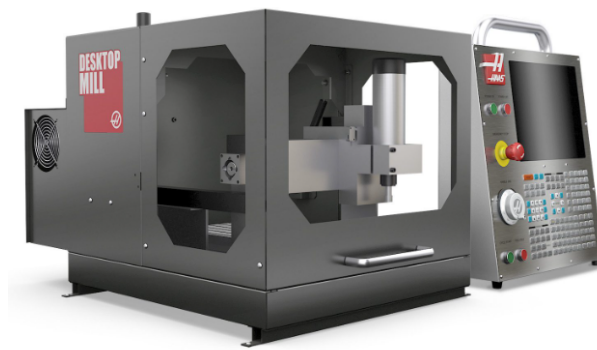


Figura 2.14: Fresadora CNC Desktop [7]

Na figura 2.14 pode se observar a versão Desktop de uma fresadora CNC da Haas Automation. Esta fresadora de dimensão reduzida tem um custo de 8695 €, conta com uma área de trabalho de 152 x 254 x 76 mm, 3 eixos e uma velocidade de rotação da fresa de 15000 RPM.

Capítulo 3

Desenvolvimento da CNC

3.1 Ideia Inicial

Como foi referido anteriormente, o objetivo deste trabalho de projeto foi a construção de uma CNC de dimensões reduzidas, que permitisse maquinar peças simples e de pequenas dimensões.

Parte Mecânica

Como ponto de partida, a estrutura da máquina foi então desenhada e pensada à volta de uma placa de alumínio de 300x420 mm e 12 mm de espessura, que neste caso foi reaproveitada de um projeto anterior. Esta placa, funcionaria como base de trabalho da CNC, sendo esta a face horizontal onde se fixa o material que seria trabalhado pela fresadora.

Também as guias lineares do eixo Y seriam fixas diretamente nesta base, funcionando esta então como suporte para toda a estrutura. O movimento em Y seria realizado a partir de 2 motores de passo e 2 fusos responsáveis por transformar o movimento de rotação dos motores em movimento linear do eixo. Este movimento será o movimento horizontal para a “frente” e para “trás” quando estamos de frente para a CNC.

O eixo X seria composto por 2 suportes, montados em cima dos carrinhos das guias Y, que seriam conectados por uma guia linear responsável pelo movimento em X da fresadora. Neste caso o movimento seria também transmitido a partir de um motor de passo e um fuso. Este movimento será o movimento horizontal para a “esquerda” e “direita” quando estamos de frente para a CNC.

O eixo Z seria então composto por uma guia linear fixa aos carrinhos das guias X, e o movimento transmitido também por um motor de passo e um fuso. Este movimento será o movimento vertical para “cima” e para “baixo” quando estamos de frente para a CNC.

Note-se que, ao longo do processo de criação do modelo 3D da máquina, foram realizadas algumas alterações a esta ideia inicial de forma a melhorar o seu funcionamento, a sua robustez e otimizar a área de trabalho da CNC.

Parte Elétrica

A ideia inicial do controlo eletrónico da CNC teve por base a utilização de um microcontrolador em conjunto com 4 drives de controlo dos motores de passo da CNC. Para alimentar os motores seria utilizada uma fonte de tensão, e o motor da fresadora seria ligado diretamente à corrente doméstica, em vez de ser incluído no circuito da CNC. O circuito de controlo seria simples, e teria um custo reduzido, no entanto seria eficaz para o que era pretendido nesta máquina. Manter o custo da parte elétrica reduzido, iria permitir aumentar a robustez da estrutura mecânica da máquina, que se traduz numa melhor qualidade de maquinação desta CNC.

3.2 Hardware Mecânico

3.2.1 Modelação 3D

Eixo Y

Na conceção inicial, previa-se que as duas guias lineares responsáveis pelo movimento horizontal Y seriam fixadas diretamente na placa de alumínio. No entanto, optou-se por outra abordagem, que consiste numa estrutura de perfis de alumínio de 40x40 a suportar a base de alumínio central, enquanto as guias lineares são fixadas diretamente aos perfis de alumínio laterais.

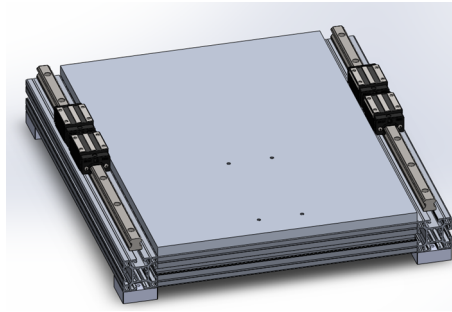


Figura 3.1: Montagem das Guias lineares Y na Estrutura

Esta opção trouxe uma serie de vantagens como:

- Ao aparafusar as guias lineares ao perfil e não à placa de alumínio foi possível aumentar a área de trabalho da CNC, relativa ao movimento X, em 60 mm.
- A utilização de perfil de alumínio traz diversas vantagens na fixação de componentes da máquina ou em possíveis atualizações futuras, utilizando as porcas de perfil adequadas.
- Com este tipo de aplicação das guias lineares, será possível alterar a máquina com alguma facilidade para trabalhar peças com uma altura superior, se necessário. Isto seria feito trocando os perfis de alumínio laterais por perfis de alumínio de 40x80, e desta forma aumentando a altura de trabalho da máquina 40 mm.
- Também seria mais fácil realizar uma alteração em relação ao espaço de trabalho do eixo Y se fosse necessário. Para isso apenas seria utilizado um perfil mais comprido em conjunto com uma guia linear maior, o que aumentaria a área de trabalho desta direção. Caso as guias fossem diretamente aparafusadas à placa de alumínio, estas alterações seriam impossíveis de realizar ou bem mais complexas e com necessidade de maquinar a placa.

Para construir a estrutura principal da CNC, composta pelos perfis e pela placa de alumínio, foram criados encaixes que permitiram a fixação dos perfis e da placa utilizando porcas de perfil M4 e 3 parafusos M4-16 mm por cada encaixe. Esses encaixes foram desenhados e impressos para garantir a precisão e facilidade na montagem da estrutura.

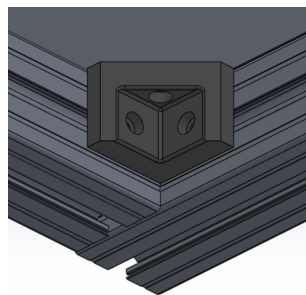


Figura 3.2: Encaixes de perfis de Alumínio

Também foram concebidos e impressos 4 pés para a CNC, que são fixados com 2 parafusos M4-16 mm e 2 porcas de perfil. Estes pés foram impressos em TPU, um filamento flexível, para proporcionar maior aderência e capacidade de absorção de vibrações da máquina.

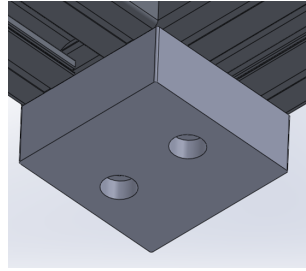


Figura 3.3: Pés Flexíveis

Neste movimento foram utilizadas 2 guias lineares HGR15-400, que têm 400 mm de comprimento e 15 mm de altura, em conjunto com 4 carrinhos HGH15CA, 2 para cada guia. Este conjunto é analisado com mais detalhe na secção 3.2.7.

As guias foram fixadas aos perfis de alumínio laterais utilizando porcas de perfil M4 em T e 7 parafusos M4-20 mm por cada guia. Neste passo é importante as guias fiquem paralelas uma à outra, então pode ser necessário voltar a afinar a sua posição quando a máquina estiver num nível mais avançado, a melhor altura será depois de o eixo X estar concluído.

Em cima de cada conjunto de carrinhos das guias lineares vai ser montada uma peça impressa responsável por suportar a porca de bronze do fuso linear Y, que vai transmitir o movimento neste eixo. A peça da esquerda e da direita vão ter algumas diferenças entre si, devido ao sistema do eixo X, estas diferenças vão ser discutidas nessa secção.

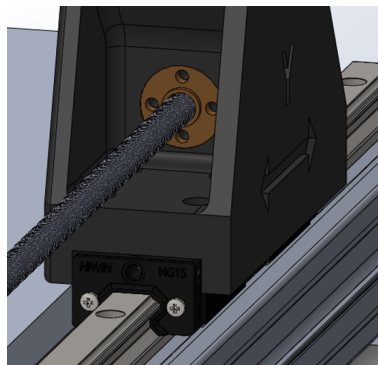


Figura 3.4: Torre Eixo Y

Note-se que para este eixo, como é visível na figura anterior, esta peça irá encaixar diretamente no conjunto dos carrinhos. Será posteriormente aparafusada aos carrinhos com 8 parafusos M4-10 mm. A porca trapezoidal do fuso, vai ser encaixada na sua posição e fixa com 4 parafusos M3-25 mm e 4 porcas M3, que têm um encaixe próprio para facilitar a montagem.

Para a montagem dos motores de passo deste eixo foi desenhada e impressa uma peça apresentada na figura 3.5.

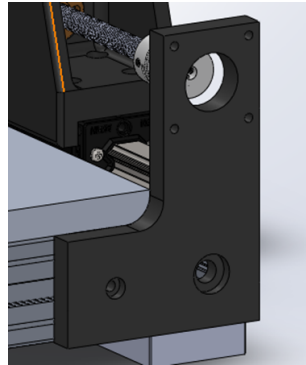


Figura 3.5: Suporte de Motor Y

Esta peça será encaixada na estrutura da máquina com um M8-20 mm aparafusado a uma rosca feita diretamente no centro do perfil, e um M4-16 mm aparafusado a uma porca de perfil. O motor é depois encaixado nesta peça e aparafusado com 4 parafusos M3-12 mm.

Do lado oposto da máquina, o fuso vai ser suportado por uma chumaceira. A chumaceira utilizada vinha com o conjunto do fuso, neste caso foi então criada uma peça onde se fixasse o suporte do rolamento. Esta peça foi então desenhada de forma a ter o mesmo tipo de montagem do suporte do motor, sendo apenas necessário um M8-20 mm e um M4-16 mm para a fixar à estrutura. Para fixar a chumaceira ao suporte foram utilizados 2 M5-16 mm e 2 porcas M5 que são colocadas nos seus encaixes.

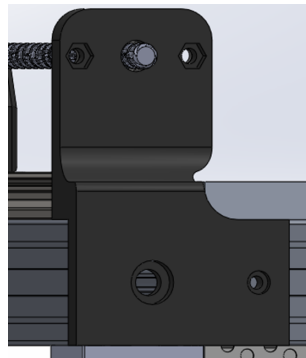


Figura 3.6: Suporte de Chumaceira Y

Por fim, para transmitir a rotação dos motores para o fuso foi utilizado o acoplamento rígido de 5-8. O estado final do sistema do eixo Y é apresentado na figura 3.7.

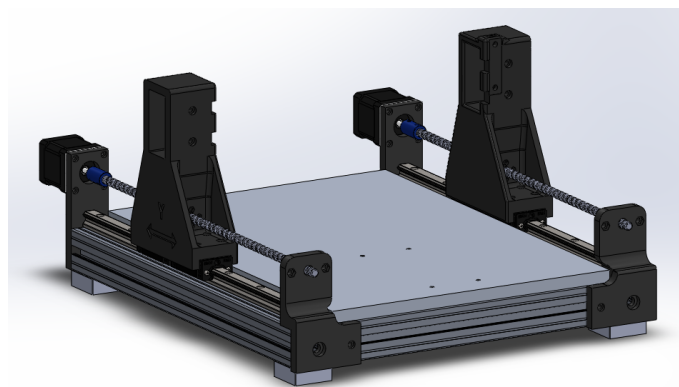


Figura 3.7: Sistema Eixo Y

Eixo X

Tal como para o eixo Y, a parte da máquina responsável por este movimento teve algumas alterações relativamente à ideia inicial. Estava previsto a utilização de apenas uma guia linear, aparafusada em cada canto às torres Y, para ser responsável por este movimento. Este design seria pouco robusto, principalmente para um processo deste tipo, então foi criada uma estrutura composta também por um perfil de alumínio para este eixo.

Vai então existir um perfil de 30x60, de 400 mm, a ligar as duas torres impressas do eixo Y. O perfil vai ser aparafusado às torres por 4 parafusos M4-16 mm e as respetivas porcas de perfil. Do lado direito vai ainda ser fixo por 2 parafusos M8-20 mm apertados a 2 roscas feitas no perfil. Do lado esquerdo da máquina o perfil fica visível, pois é a zona onde vai ser encaixado o suporte do motor deste eixo. Desta forma obtém-se então uma estrutura tipo pórtico, como é apresentado na figura 3.8.

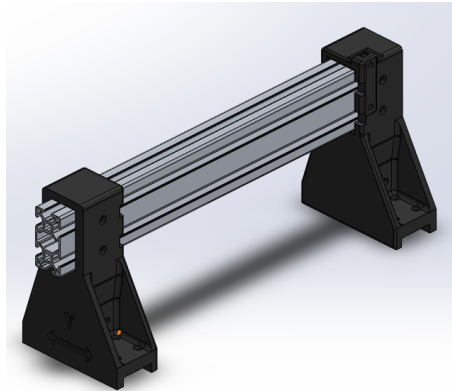


Figura 3.8: Pórtico do eixo X

De seguida, foram selecionadas as guias lineares MGN12-300 com os respetivos carrinhos MGN12H para serem responsáveis por teste movimento. O tipo de guias escolhido é bastante utilizado nas impressoras 3D, e neste caso foram utilizadas 2 guias, para distribuir a força da ferramenta por elas, dando mais robustez à estrutura. Estas guias serão diretamente aparafusadas ao perfil de alumínio com 12 parafusos M3-12 mm e as respetivas porcas de perfil M3. As torres laterais da máquina foram desenhadas de forma a incluir um encaixe das guias, que permite garantir o paralelismo entre elas e a base da máquina de uma forma mais simples, como se pode verificar na figura 3.9.

Este conjunto é analisado com mais detalhe na secção 3.2.8.

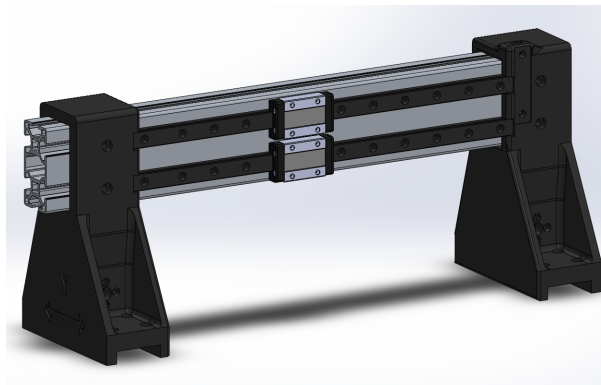


Figura 3.9: Guias Lineares Eixo X

Por cima dos carrinhos do eixo X, é montada uma peça impressa em PLA responsável por suportar o sistema de movimento do eixo Z e por consequente a fresadora da máquina. Para fixar esta peça aos carrinhos das guias lineares foram utilizados 8 parafusos M3-12 mm. Esta peça terá também uma posição onde será encaixada a porca de bronze do fuso que transmite o movimento X.

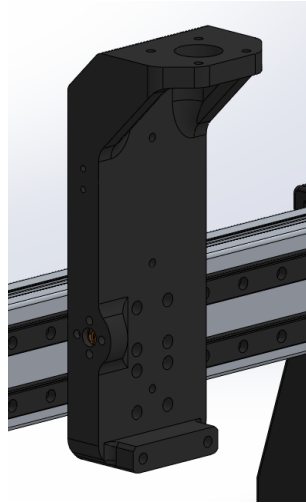


Figura 3.10: Suporte do Eixo Z

Ao contrário do que foi feito para o eixo Y, em que foram utilizadas 4 porcas M3 em conjunto com os parafusos para fixar a porca trapezoidal do fuso, neste caso devido à posição em que ela se encontra foi optado por se fazer 4 roscas M4 diretamente na porca de bronze e fixá-la desta forma ao suporte da guia Z utilizando 4 parafusos M4-12 mm.

Para suportar o motor X foi criada uma peça que se encaixa do lado esquerdo do perfil de alumínio onde é aparafusada com 2 parafusos M8-20 mm em 2 roscas feitas nos 2 centros do perfil. O motor é depois encaixado neste suporte e aparafusado com 4 parafusos M3-12 mm.

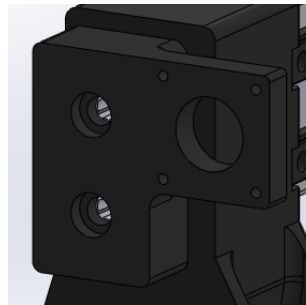


Figura 3.11: Suporte do Motor X

Tal como para os outros eixos, vai também ser utilizado um acoplamento rígido de 5-8 para transferir a rotação do motor para o fuso, que neste caso terá 350 mm.

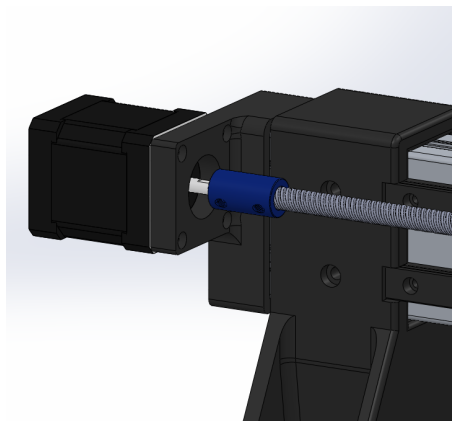


Figura 3.12: Acoplamento do Motor X ao Fuso

O fuso vai ser suportado do lado contrário do motor por uma chumaceira que é aparafusada na torre da direita, que tem uma saliência e os furos feitos especificamente para encaixar a chumaceira, garantindo assim o centro do rolamento com o fuso, com a porca trapezoidal, e com o motor. Para fixar o sistema são utilizados 2 parafusos M5-12 mm e 2 porcas que encaixam em posições específicas da torre, para que seja possível aparafusar a chumaceira de uma forma mais simples.

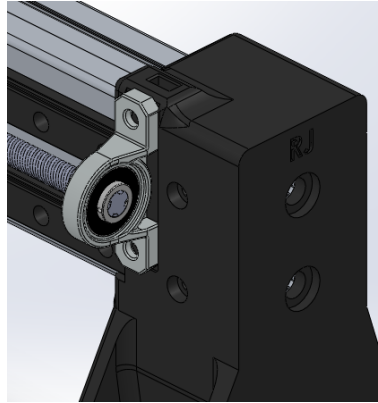


Figura 3.13: Chumaceira do eixo X

O estado final do sistema do eixo X, depois de montados todos os componentes, é o apresentado na figura 3.14.

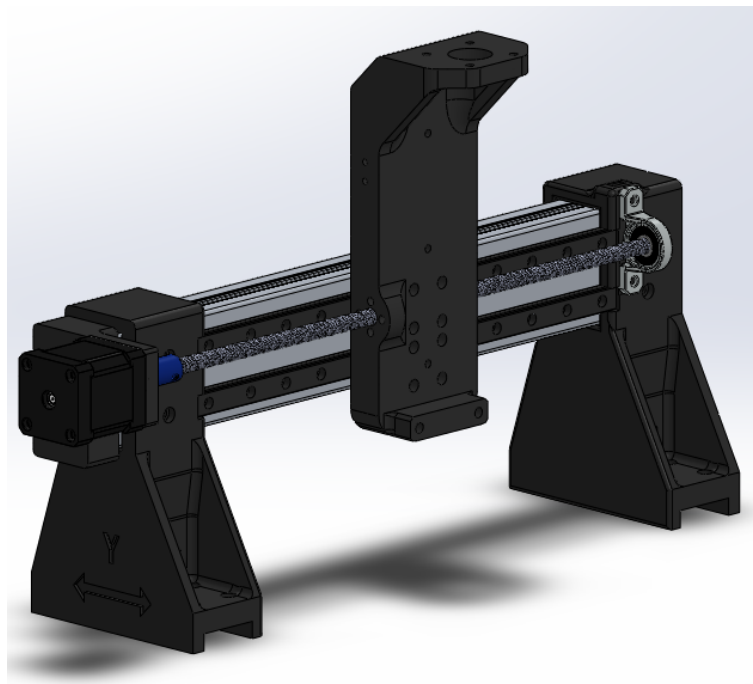


Figura 3.14: Sistema Eixo X

Eixo Z

Por fim, para o terceiro movimento da CNC, o eixo Z vai ser desenhado à volta do suporte da figura 3.10, que está fixo aos carrinhos do eixo X. No caso deste eixo foi utilizada apenas uma guia de 160 mm, e um carrinho com um formato que se ajustava bem à aplicação. O conjunto utilizado foi então uma guia THK e um carrinho THK HSR15. A guia foi aparafusada ao suporte do eixo com 3 parafusos M4-28 mm em conjunto com 3 porcas M4 que encaixam diretamente no suporte.

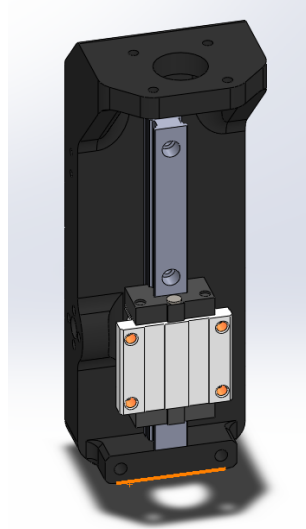


Figura 3.15: Guia Linear Z

Por cima deste carrinho vai então ser montada a peça responsável por fixar o motor da fresa da CNC, para tal vão ser utilizados 4 parafusos M5-20 mm que vão aparafusar diretamente no carrinho. Esta peça vai portanto ser constituída por uma espécie de furo circular com o diâmetro do motor, que será rasgada de um dos lados, como se pode ver na figura 3.16, onde vão existir 3 furos para parafusos M5-25 mm que em conjunto com 3 porcas M5 que vão ser responsáveis por dar o aperto necessário ao motor para que este não se mova durante a operação da CNC.

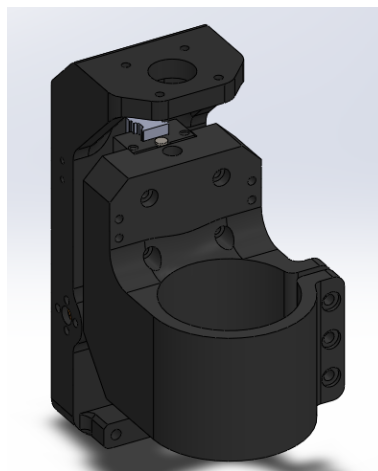


Figura 3.16: Suporte da Fresadora

Nesta peça vai foi também desenhado o encaixe necessário para a montagem da porca trapezoidal do fuso deste eixo, bem como um furo para a sua passagem. Também neste caso a porca de cobre foi trabalhada para ter 4 roscas M4, e desta forma apenas ser necessário 4 parafusos M4-12 mm para a fixar.

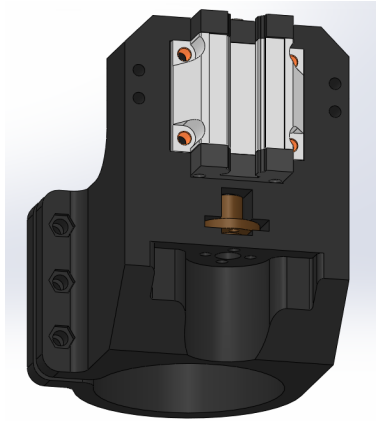


Figura 3.17: Encaixe de Porca do Fuso

O motor Z vai ser encaixado na parte superior do suporte e aparafusado utilizando 4 parafusos M3-12 mm. A ligação ao fuso vai também ser feita por um acoplamento rígido de 5-8, tal como em toda a máquina. O Fuso do eixo Z vai ter um comprimento de 180 mm.

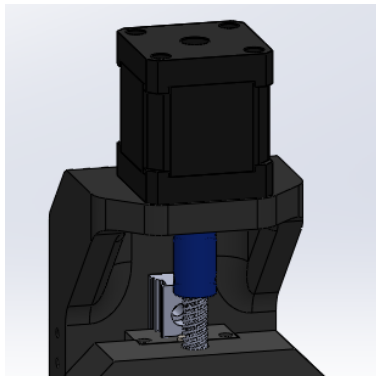


Figura 3.18: Acoplamento do Motor Z ao Fuso

Na parte inferior do suporte vai ser aparafusada a chumaceira de apoio do fuso Z, para isso são usados 2 parafusos M5-40 mm e 2 porcas M5 que são encaixadas na parte de trás da peça.

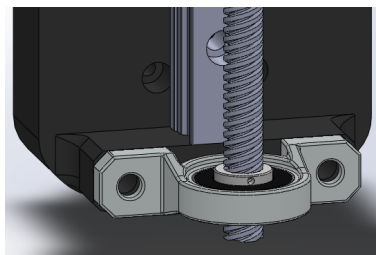


Figura 3.19: Chumaceira do Eixo Z

Na figura 3.20 pode se observar uma vista isométrica do modelo final da fresadora CNC, na qual se encontram incluídos os 3 eixos discutidos neste capítulo.

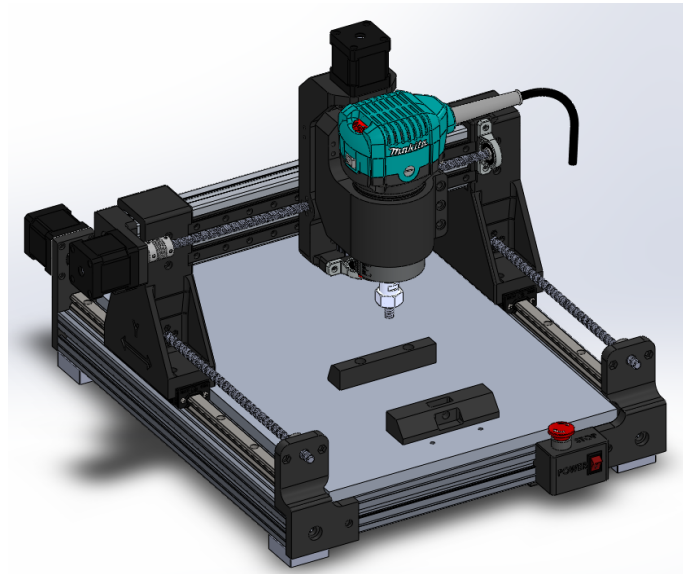


Figura 3.20: CNC Model Isometric View

Na figura 3.21 pode-se observar o resultado final do projeto após a montagem de todos os componentes.

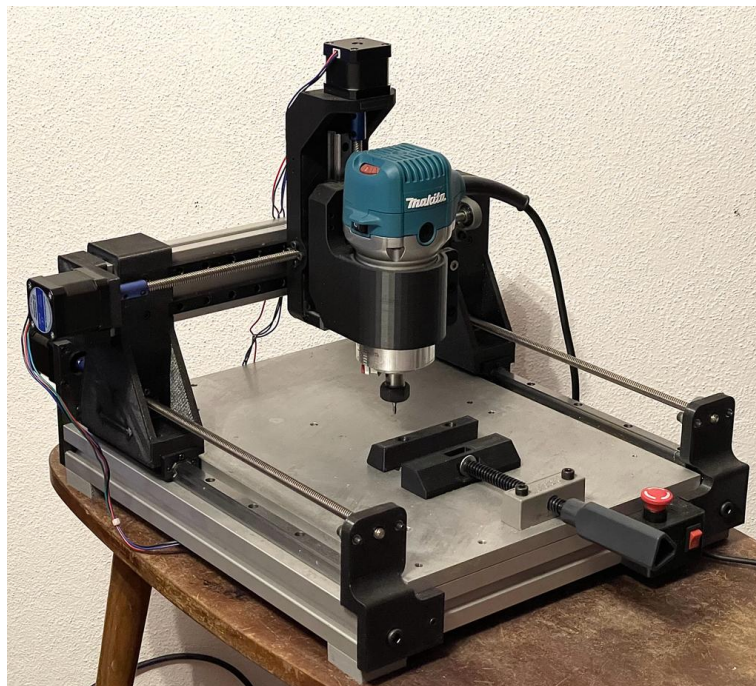


Figura 3.21: CNC Após Montagem

Em ambas as figuras pode-se ainda observar um dos possíveis sistemas de fixação das peças a ma-
quinar. Pode-se também observar 2 botões, responsáveis por alimentar a CNC e cortar a energia dos
motores em caso de emergência, respetivamente.

3.2.2 Impressão 3D dos Componentes

A técnica aditiva de fabrico, também conhecida como impressão 3D, revolucionou a forma como várias peças são produzidas. Ao contrário dos métodos tradicionais de fabricação, nos quais o material é moldado ou retirado para obter a forma desejada, tal como acontece no processo de fresagem referido na secção 2.1, a técnica aditiva constrói objetos camada por camada, adicionando material de forma controlada.

A ideia central por trás da técnica aditiva é utilizar um modelo tridimensional (3D), que é criado em softwares CAD, para controlar o processo de fabricação. Esse modelo digital é dividido em camadas finas, e a impressora 3D deposita o material, seja ele plástico, carbono, cerâmica ou outros, camada por camada, de acordo com as especificações do modelo 3D.

Existem diferentes tipos de tecnologias aditivas disponíveis, que resultam em diferentes tipos de impressoras 3D, a tecnologia de deposição de material fundido (FDM), a síntese seletiva a laser (SLS) e a estereolitografia (SLA) são algumas destas tecnologias.

A impressão 3D oferece várias vantagens significativas em comparação com os métodos tradicionais de fabricação:

- A impressão 3D permite a produção de objetos altamente personalizados e sob medida. Os projetos podem ser facilmente adaptados para atender às necessidades específicas de cada pessoa, sem necessidade de criação de um modelo 2D.
- A impressão 3D pode reduzir os custos de produção, especialmente em comparação com os métodos tradicionais de fabricação, como moldagem por injeção ou fresagem CNC.
- A tecnologia de impressão 3D permite a prototipagem rápida de projetos. Os objetos podem ser projetados e impressos em questão de horas ou dias, permitindo que os designers e engenheiros testem e iterem rapidamente suas ideias antes de investir em produção em massa.
- A impressão 3D permite a fabricação de objetos com formas e geometrias complexas que seriam difíceis ou impossíveis de serem produzidos usando métodos tradicionais.
- A impressão 3D permite uma produção rápida e eficiente, o que pode reduzir significativamente o tempo de comercialização de um produto.
- A impressão 3D pode ser mais sustentável em comparação com os métodos tradicionais de fabricação, pois pode reduzir o desperdício de material.

No entanto note-se que nem tudo são pontos positivos, ainda não sendo possível criar peças com a mesma dureza ou acabamento como em fresadoras CNC e outras máquinas, o que significa que nem todos os componentes desejados podem ser fabricados nestes tipos de máquinas.

Para este projeto foi utilizada uma impressora 3D FDM, ou seja de deposição de material fundido, a Ender 3 V2 da Creality, que é apresentada na figura 3.22.

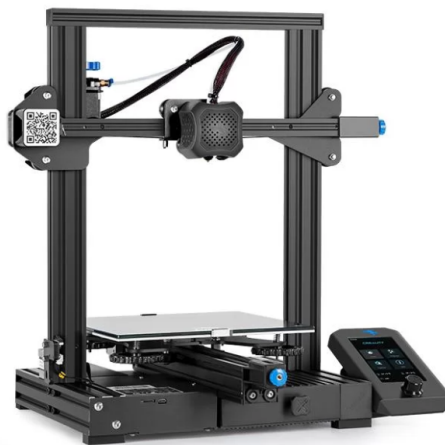


Figura 3.22: Ender 3 V2 [8]

Impressora 3D FDM

As impressoras 3D FDM (Fused Deposition Modeling) são um tipo popular de impressoras 3D que utilizam a tecnologia de deposição de filamento fundido para criar objetos 3D. Estas impressoras são conhecidas por sua facilidade de uso, acessibilidade, elevada disponibilidade no mercado e custos reduzidos.

O processo de impressão FDM começa com um filamento de material termoplástico, como PLA, PETG ou ABS, que é alimentado até à extrusora, onde o filamento é aquecido até que atinja o estado líquido, tornando-se facilmente moldável. Em seguida, o material derretido é depositado camada por camada, à medida que a cabeça de impressão (nozzle) se move ao longo dos eixos X, Y e Z, seguindo as instruções do modelo 3D.

Na tabela 3.1 são apresentadas algumas das características técnicas da impressora utilizada [8].

Tecnologia de impressão	FDM (Fused Deposition Modeling)
Potência	270 W
Área de impressão	220 mm x 220 mm x 250 mm
Diâmetro do filamento	1,75 mm
Precisão de impressão	$\pm 0,1$ mm
Velocidade de impressão	Até 200 mm/s (recomendado: 60 mm/s)
Temperatura do Nozzle	Até 260 °C
Temperatura da mesa	Até 100 °C

Tabela 3.1: Características Técnicas da Creality Ender 3 V2 [8]

Filamento Utilizado

Para a construção das peças referidas no capítulo 3 foi utilizado filamento de PLA (ácido polilático). O PLA é um polímero biodegradável e termoplástico, feito a partir de recursos renováveis, como amido de milho, mandioca ou cana-de-açúcar. A constituição do PLA é baseada em unidades de ácido lático. O PLA é conhecido por características como a alta rigidez, boa resistência à tração e estabilidade dimensional. Este material não é resistente a altas temperaturas e pode começar a deformar ou amolecer em torno de 60-70 °C, no entanto este factor não foi crítico para a aplicação das peças desejadas.

As definições de impressão e as características mecânicas deste filamento são apresentadas na tabela 3.2 [18]. É sempre importante verificar se a impressora 3D tem capacidade para imprimir o filamento, comparando as suas características com as do filamento, uma vez que existem vários filamentos com características críticas que dificultam ou impossibilitam a sua impressão nas máquinas mais comuns. Os filamentos de PLA são no entanto os mais comuns e por isso não apresentam qualquer impedimento para a impressora utilizada.



Nozzle Temperature	210 ± 10 °C
Heatbed Temperature	40–60 °C
Print Speed	up to 200 mm/s
Cooling Fan Speed	100 %
Density	1.24 g/cm ³
Heat Deflection Temperature (0.45 MPa)	55 °C
Tensile Yield Strength for Filament	57 ± 1 MPa
Interlayer Adhesion	17 ± 3 MPa

Tabela 3.2: Características PLA Galaxy Black [18]

Componentes Impressos

O processo de impressão 3D das peças para este projeto, após a criação dos modelos 3D passa por dividi-lo em camadas, para que a impressora possa construir o objeto camada por camada. O software de *slicing*, como o Ultimaker Cura que foi utilizado neste projeto, é responsável por realizar este processo e gerar o G-Code de controlo da Impressora.

Após importar o modelo 3D, o software oferece várias opções para personalizar as configurações de impressão, como a velocidade de impressão, a densidade do preenchimento, a resolução das camadas, o tipo de suporte necessário na impressão entre muitas outras opções como se pode verificar na figura 3.23.

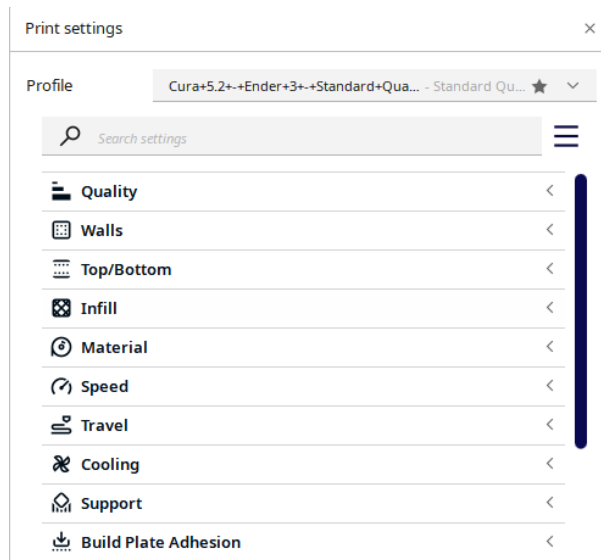


Figura 3.23: Print Settings

As definições utilizadas para a impressão dos componentes foram as recomendadas pelo fabricante do filamento, que foram apresentadas na tabela 3.2. A velocidade de impressão utilizada foi a recomendada na tabela 3.1, as peças foram impressas com 70 % de preenchimento, para reduzir o consumo de material, mas sem afetar a rigidez.

Na figura 3.24 é apresentado o modelo do suporte do motor do eixo referido na figura 3.11, após o *slicing* no Ultimaker Cura. Nesta figura, à esquerda é possível verificar as camadas de filamento que serão depositadas até formar a peça, à direita é possível observar o preenchimento de 70 % utilizado nas peças.

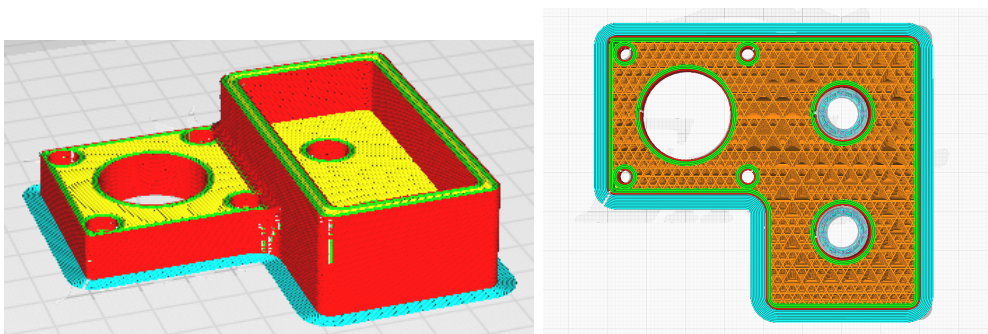


Figura 3.24: Suporte Motor X Ultimaker Cura

Para cada um dos componentes impressos da CNC foi repetido o mesmo processo começando pelo desenho 3D do componente durante o projeto, o *slicing* do modelo no Ultimaker Cura de forma a criar o G-Code necessário, e por fim a impressão do componente em PLA utilizando a Ender 3 V2. No total foram impressos 14 componentes, que resultaram em 108 h e 52 min de tempo de impressão e num custo material de aproximadamente 45 €. Estes e outros dados podem ser consultados na tabela 3.3.

Componente	Quant.	Tempo de Impressão	Quant. Filamento	Custo
Encaixe de perfis	4	5 h 46 min	66 g	1.98 €
Torre Direita Eixo Y	1	23 h 13 min	300 g	9 €
Torre Esquerda Eixo Y	1	22 h 07 min	288 g	8.65 €
Suportes Motores Y	2	7 h 8 min	94 g	2.82 €
Suportes Chumaceiras Y	2	4 h 42 min	147 g	4.42 €
Suporte do Eixo Z	1	18 h 12 min	231 g	6.94 €
Suporte Motor X	1	3 h 33 min	43 g	1.30 €
Suporte da Fresadora	1	21 h 9 min	257 g	7.72 €
Suporte de Botões	1	3 h 2 min	35 g	1.05 €
Total:	14 und	108 h 52 min	1461 g	43.88 €

Tabela 3.3: Informação sobre Componentes Impressos

Para o cálculo do custo energético da impressão dos componentes, sendo o consumo da impressora de 270 W conforme a tabela 3.1 e um tempo de impressão de aproximadamente 109 h, podemos obter o consumo total da impressão de 29,4 kWh. Considerando um custo médio de uma rede doméstica de 0,157 €/kWh, significa que o custo energético da impressão dos componentes da CNC foi de aproximadamente 5 €.

3.2.3 Nema 17

Motores de Passo

O tipo de motores mais utilizado para aplicações que necessitam de movimentos precisos são os motores de passo. Estes motores são atuadores eletromecânicos que convertem impulsos elétricos em deslocamentos angulares precisos, ou seja, a cada impulso que o controlador envia, o motor roda um determinado ângulo, que é o passo do motor [9]. Para se percorrer uma determinada distância com o nosso sistema é então aplicado um determinado número de impulsos ao motor.

Devido à sua simplicidade de controlo e elevada precisão, estes motores dominam em aplicações de movimentos precisos controlados por sistemas digitais.

Dentro dos motores de passo existem 3 tipos que se destacam, sendo estes os motores de íman permanente, os de relutância variável e os motores híbridos.

Motor de Íman Permanente: Neste motor o estator é normalmente composto por 2 secções de enrolamento, uma superior e uma inferior, e por vários conjuntos de polos magnéticos distribuídos em volta do rotor. O rotor é composto por conjuntos de Ímanes permanentes N-S dispostos num cilindro em torno do veio. Quando a corrente é aplicada aos enrolamentos do estator, são criados polos magnéticos N e S no estator. Os Ímanes permanentes do rotor N serão atraídos pelos polos magnéticos S do estator, S pelos N, causando a rotação do motor. Para criar uma rotação contínua é apenas necessário ir alimentando os 2 enrolamentos do estator sucessivamente. Este tipo de motores tem tipicamente um passo superior a 7.5° .

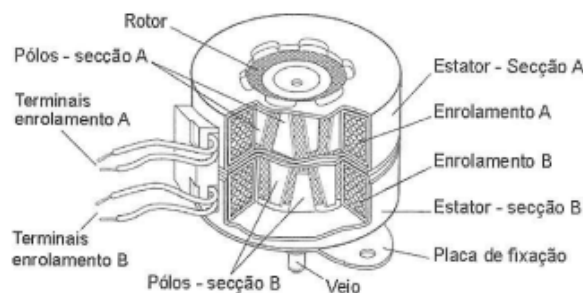


Figura 3.25: Motor de Passo de Íman Permanente [9]

Motor de Relutância Variável: Este motor é composto por um rotor feito de um material com boa permeabilidade magnética com polos salientes e um estator, também com polos salientes, composto por 3 ou mais conjuntos de enrolamentos. Quando os enrolamentos do estator são alimentados, os seus polos são magnetizados e atraem os polos do rotor que estão mais próximos, gerando a rotação do motor. A relutância é mínima quando os dentes magnetizados do estator estão alinhados com os do rotor. Para um motor com 3 conjuntos de enrolamentos, sendo cada par colocado a 180° um do outro e sendo ligado em série, a rotação do rotor é obtida se os 3 enrolamentos forem alimentados consecutivamente numa determinada ordem. Estes motores têm tipicamente mais precisão que os motores de íman permanente mas perdem no binário fornecido, não sendo então utilizados em aplicações onde o motor precisa de exercer um binário elevado.



Figura 3.26: Motor de Passo de Relutância Variável [9]

Motor Híbrido: Este motor combina os princípios do motor de íman permanente com o do motor de relutância variável, o que lhe permite ter um passo pequeno, tipicamente de 1.8° , e um binário elevado. O rotor é constituído por um íman permanente e massas polares acopladas aos polos N e S do íman. O estator, por sua vez, é normalmente composto por 2 enrolamentos com várias bobinas e polos magnéticos dispostos em frente às massas polares do rotor. Este tipo de motor, combina as maiores vantagens dos motores referidos acima, e é por isso usado em uma variedade de aplicações, incluindo equipamentos de automação industrial, máquinas CNC, impressoras 3D, scanners entre outras aplicações de controlo de movimento.,

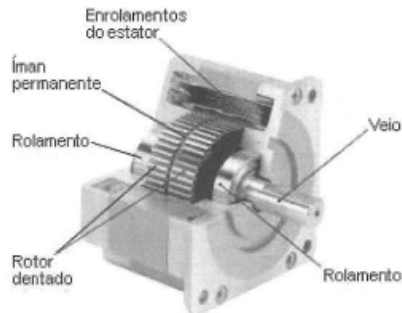


Figura 3.27: Motor de Passo Híbrido [9]

Para a aplicação deste trabalho de projeto, a opção que melhor se adequa é então um motor de passo híbrido.

Sendo o objetivo do projeto a criação uma CNC de dimensão reduzida e de baixo custo que permita maquinar materiais macios, é importante selecionar um motor que tenha capacidade para suportar as forças exercidas nos eixos durante a maquinação mas que tenha um custo e tamanho reduzido.

O motor selecionado para controlar os eixos da CNC foi então o Nema 17 59 Ncm. Este motor tem um binário superior aos motores utilizados na maioria das impressoras 3D e pequenas CNCs no mercado, enquanto mantém um tamanho e preço reduzido [20].

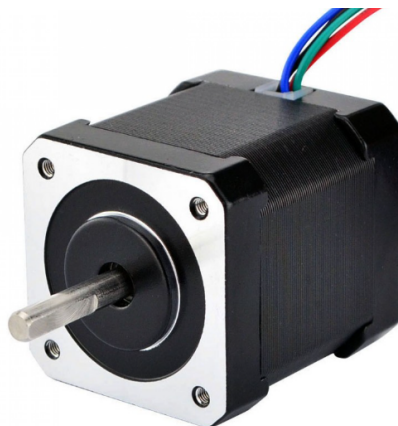


Figura 3.28: Nema 17 59Ncm [10]

Estes motores são Bipolares, ou seja, o estator tem 2 enrolamentos iguais, onde é possível circular a corrente tanto num sentido como noutro, o que permite criar um campo magnético com uma determinada polaridade uma vez e com a polaridade contrária de outra vez. Este tipo de motor acaba por ter uma construção mais simples que o unipolar e tem um binário superior para motores do mesmo tamanho. Cada motor vai então ter 4 cabos de ligação, referentes aos 2 enrolamentos do motor.

Nema 17 é um tipo de motores de passo standard com uma estrutura frontal quadrada de 42.3 mm de lado, ou de 1.7 polegadas, que é de onde provem o nome deste modelo.

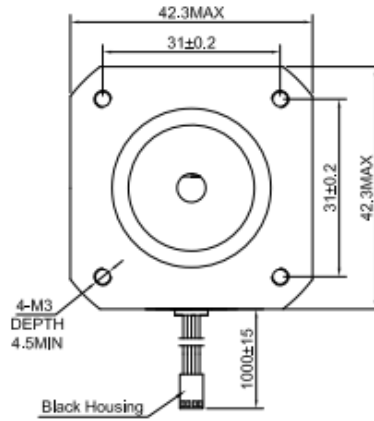


Figura 3.29: Desenho Frente Nema 17 [10]

O que varia nos vários motores Nema 17 é o comprimento destes, que é proporcional ao binário por eles fornecido. Para esta aplicação foi selecionada a versão com um binário de manutenção de 59 Ncm, que corresponde ao binário máximo que o motor consegue aguentar quando está a manter uma posição. Esta característica tem bastante importância neste processo pois durante a maquinação de uma peça, é crucial para o sucesso da maquinação, que quando apenas um eixo se está a movimentar os restantes mantenham a sua posição.

O binário deste motor para o eixo que está em movimento vai variar conforme a velocidade desse movimento, como se pode verificar na curva da figura 3.30 [11]. Note-se que o maior binário do motor acontece nas velocidades de rotação mais baixas, o que pode ser uma boa indicação para as velocidades que vamos selecionar durante a maquinação.

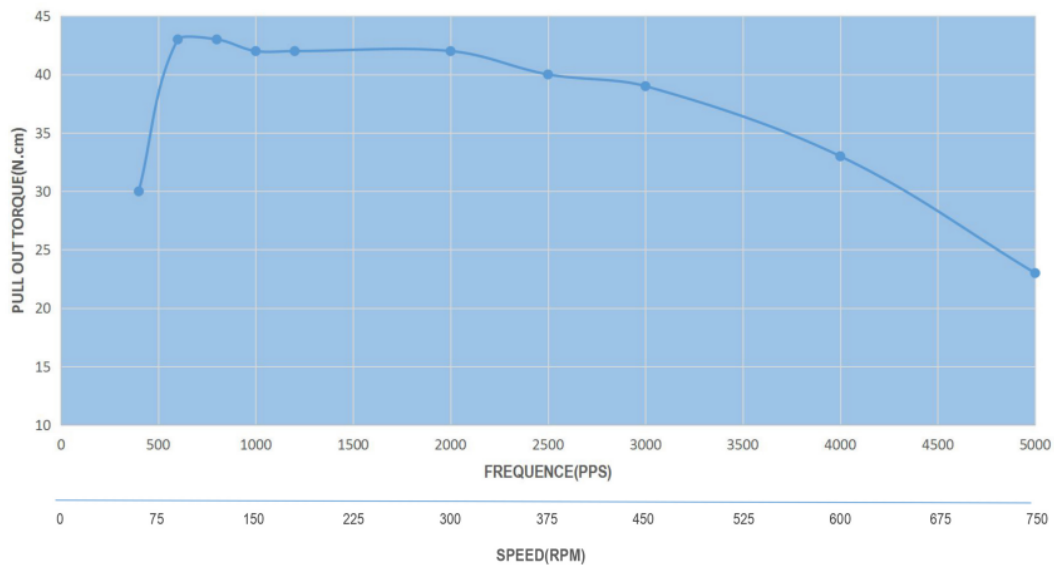


Figura 3.30: Binário Vs Velocidade do Motor [11]

O passo do motor utilizado é de 1.8° , o que significa que a menor rotação possível de se realizar equivale a este valor. Desta forma seriam então necessários 200 impulsos para o motor realizar uma volta completa [10].

Note-se que, tal como vai ser abortado na secção 3.3.5, na realidade não é isto que acontece pois com a ajuda das drives de controlo do motor é possível diminuir o valor do passo.

Quanto às características elétricas do motor utilizado, este pode consumir até 2 A por cada fase, o que significa que alguns dos controladores mais baratos como o A4988, que tipicamente vêm em conjunto com os kits do CNC Shield não são adequados. É por esta razão que neste projeto são utilizados os controladores DRV8825, que como é discutido na secção 3.3.5 têm uma corrente de output de até 2.5 A.

Por fim é também importante referir a dimensão do veio do motor, neste caso de 5 mm como é visível na figura 3.31. Esta dimensão é importante para a secção 3.2.6 onde vai ser escolhido o tipo de acoplamento para o motor.

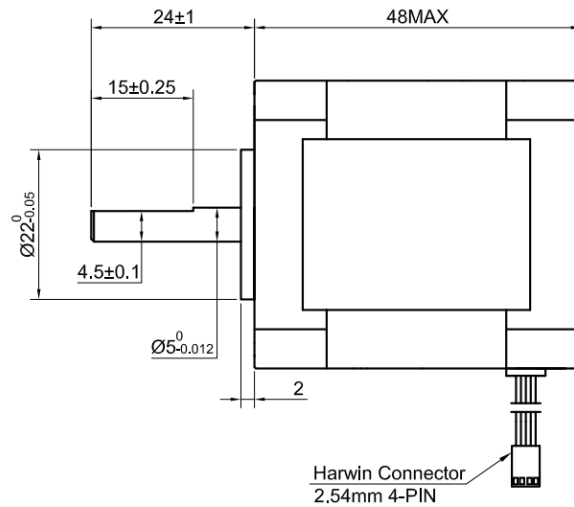


Figura 3.31: Desenho Lateral Nema 17 [10]

3.2.4 Fuso Trapezoidal T8

Para o tipo de motores utilizados neste projeto existem 2 tipos de transmissão, responsáveis por transformar o movimento de rotação em movimento linear, que tipicamente se utilizam. Os 2 sistemas seriam a transmissão com meio de uma correia ou de um fuso linear, sendo a segunda opção a selecionada para este projeto devido a uma série de vantagens que esta tem relação à anterior:

- A transmissão por correia tem sempre inerente uma folga devido à elasticidade da correia, que pode ser maior ou menor consoante a tensão aplicada na correia. Também entre os dentes da engrenagem e a correia existiria sempre uma pequena folga. No caso da transmissão por fuso linear a única folga existente é a existente entre a rosca do fuso e a rosca da respetiva porca.
- A precisão dos eixos seria sempre maior com o fuso linear, uma vez que com cada rotação completa do motor vamos ter um movimento de 8 mm no respetivo eixo. Para isto acontecer no caso da correia, como a distância que o eixo se move durante uma volta do motor seria dada pelo perímetro da engrenagem, seria necessária uma engrenagem com um diâmetro de aproximadamente 2.5 mm, o que não seria funcional uma vez que só o veio do motor tem um diâmetro 2 vezes maior.
- O sistema de fuso em geral é mais robusto e é o tipo de sistema utilizado em CNCs industriais. Sendo no entanto nesses casos utilizados fusos de esferas que quase eliminam as folgas na totalidade.

O fuso selecionado para esta função foi então um fuso de chumbo trapezoidal T8, ou seja com 8 mm de passo. Em conjunto com o fuso, a respetiva porca de bronze vai ser onde vão ser aparafusados os elementos dos eixos que queremos movimentar.

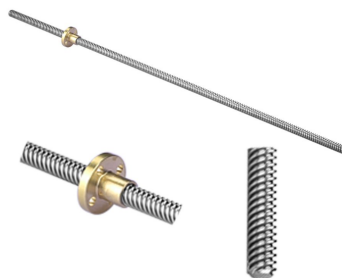


Figura 3.32: Fuso Trapezoidal T8

O fuso utilizado tem então um diâmetro de 8 mm e o comprimento vai variar conforme o eixo da CNC, como já foi visto nas seções anteriores. Note-se que, como se pode ver no desenho 3.33, que o diâmetro dos furos para fixação da porca ao objeto que queremos movimentar é de 3.5 mm, o que nos permitiu na seção 3.2.1, fazer roscas M4 diretamente nestes furos.

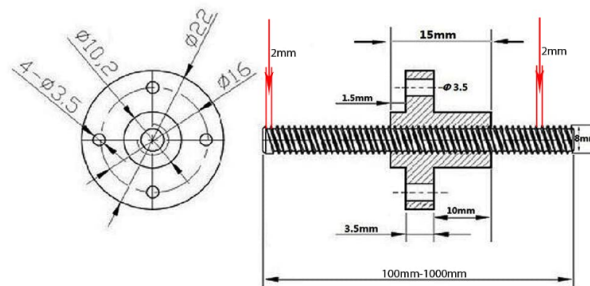


Figura 3.33: Desenho de Fuso e Porca Trapezoidal

3.2.5 Chumaceiras

Neste projeto foram utilizados 2 tipos de chumaceiras para suportar os fusos lineares. A sua principal função é servir de suporte para os fusos do lado contrario aos motores e são compostas por um rolamento encaixado num suporte que é aparafusado á maquina.



Figura 3.34: Chumaceiras Utilizadas no Projeto

As chumaceiras têm também 2 pernos na zona interior do rolamento, que permitem fixar o fuso numa posição específica. Isto é importante uma vez que desta forma estas chumaceiras suportam uma parte do esforço axial que existe durante a maquinação, sem criar atrito na rotação do motor.

3.2.6 Acoplamento Rígido 5-8

Para transmitir a rotação dos motores para os fusos é necessário utilizar um acoplamento. Tendo em consideração as medidas destes elementos, vai ser utilizado um acoplamento de 5-8. Inicialmente foi utilizado um acoplamento flexível de 5-8, no entanto estes acoplamentos foram trocados para acoplamentos rígidos em toda a máquina, para que a folga durante a maquinação, causada pela parte flexível do acoplamento, fosse eliminada.



Figura 3.35: Acoplamento Rígido

Estes acoplamentos são encaixados entre o veio do motor e o fuso, e posteriormente os pernos visíveis na figura 3.35 são aparafusados para fixar a ligação.

3.2.7 HGH15CA

Para o eixo Y foi utilizado um conjunto de 4 carrinhos HGH15CA e as respetiva guias HGR15 com 400 mm. Este tipo de guias lineares são construídas para aplicações com cargas elevadas e vários ciclos, sendo o sistema dos carrinhos composto por 4 filas de esferas de aço que circulam dentro do bloco. Na guia existem 4 ranhuras com o raio das esferas onde estas vão deslizar durante o funcionamento, como pode ser observado na figura 3.36.

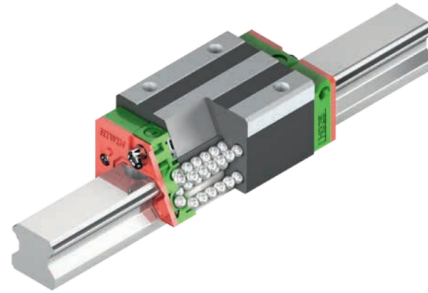


Figura 3.36: Sistema de Funcionamento do carrinho HGH15CA [12]

Devido à distribuição das esferas, a 45° entre cada fila, estas guias lineares podem ser submetidas a esforços de igual valor em todas as direções [12]. Como se pode verificar na figura 3.36 os carrinhos têm ainda 1 copo de lubrificação que está ligado ao circuito de esferas. Este tipo sistema permite que não existam folgas entre o carrinho e a guia linear, o que é bastante importante numa máquina deste tipo, enquanto mantendo um movimento linear e fluido.

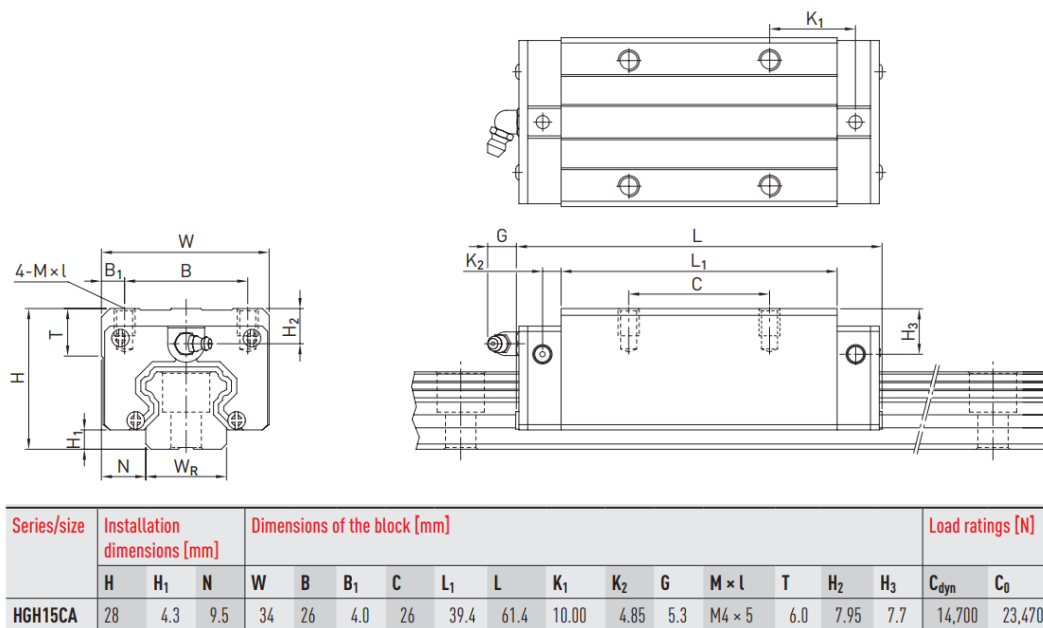


Figura 3.37: Dados Técnicos da Guia HGH15CA [12]

As dimensões da guia linear, importantes para a modelação do encaixe das torres do eixo Y, podem ser verificadas na figura 3.37. Note-se que este bloco tem 4 roscas M4 que foram utilizadas para a fixação das torres.

Estas guias possuem uma distância de trabalho útil de 20000 km, ou seja, são desenhadas para fazerem pelo menos essa distância em movimentos de uma aplicação até precisarem de ser trocadas. Para o caso desta aplicação, que faz maioritariamente distâncias curtas, isso significa uma elevada durabilidade destes componentes.

3.2.8 MGN12H

Para o eixo X foi selecionado um sistema de guias lineares composto por 2 guias MGN12 com 300 mm, e 2 carrinhos MGN12H que circulam nestas guias. Estas guias têm um tamanho bem mais reduzido em comparação com as utilizadas no eixo Y, o que também diminui um pouco a sua robustez. No entanto, para este eixo era importante selecionar um conjunto mais compacto para reduzir o tamanho e peso da estrutura montada no sistema do eixo Y. Para este projeto, como foi observado na figura 3.9, foram colocadas 2 guias paralelas o que irá dividir as cargas nelas aplicadas. Esta disposição das guias também vai aumentar significativamente a capacidade de suportarem momentos fletores, que é comum existirem nesta zona da máquina durante a maquinação.

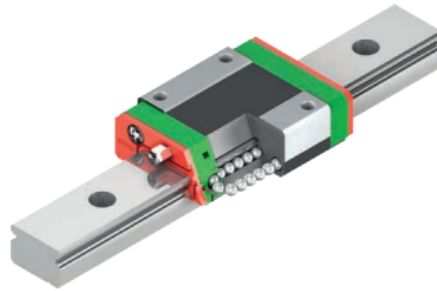
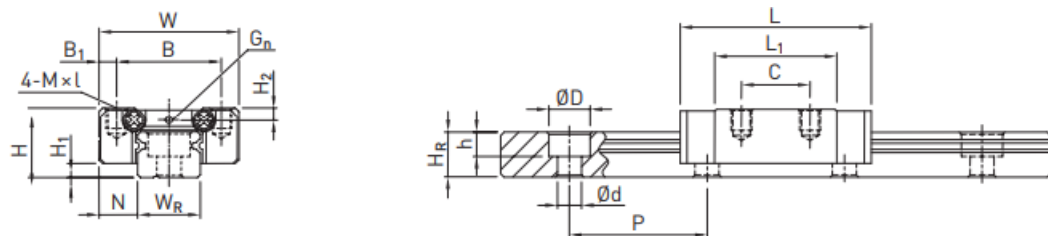


Figura 3.38: Sistema de Funcionamento dos carrinhos MGN12H [12]

Os carrinhos destas guias lineares são compostos por 2 filas de esferas de aço que circulam dentro do bloco [12]. Cada fila vai deslizar em 2 ranhuras com um arco em V onde encaixam as esferas, que estão maquinadas de cada lado da guia MGN12, como se pode observar na figura 3.38.

Na figura 3.39 são apresentadas as dimensões da guia linear, que foram importantes para modelar o suporte do eixo Z, que vai ser encaixado e aparafusado a estas guias como foi referido na secção 3.2.1.



Series/size	Installation dimensions [mm]			Dimensions of the block [mm]									Load ratings [N]		Weight [kg]	
	H	H ₁	N	W	B	B ₁	C	L ₁	L	G	G _n	M × l	H ₂	C _{dyn}		C ₀
MGN12C	13	3.0	7.5	27	20	3.5	15	21.7	34.7	—	∅2	M3 × 2.5	2.5	2,840	3,920	0.030
MGN12H							20	32.4	45.4			3.5		3,720	5,880	0.050

Figura 3.39: Dados Técnicos da Guia MGN12H [12]

Como se pode verificar também na figura as guias têm 4 roscas M3 que neste projeto são utilizadas para fixar o suporte do eixo Z às guias lineares.

Para uma carga constante de 10 kg a THK, uma marca japonesa especialista em sistemas de movimentos lineares, estima que uma guia deste tipo tenha uma distancia de trabalho útil de 20000 km, tal como a guia utilizada no eixo Y.

3.2.9 HSR15

O sistema de movimento linear utilizado para o eixo Z foi um carrinho HSR15 em conjunto com uma guia HSR15 de 160 mm. Tal como as guias HGH15CA, estas guias são compostas por 4 filas de esferas de aço que circulam dentro do bloco. Como é demonstrado na figura 3.40 do fabricante THK [13], a posição de circulação das esferas no carril são de 45° entre si, o que permite ao bloco sofrer cargas da mesma ordem de grandeza em qualquer direção, isto permite a sua utilização na maioria das aplicações.

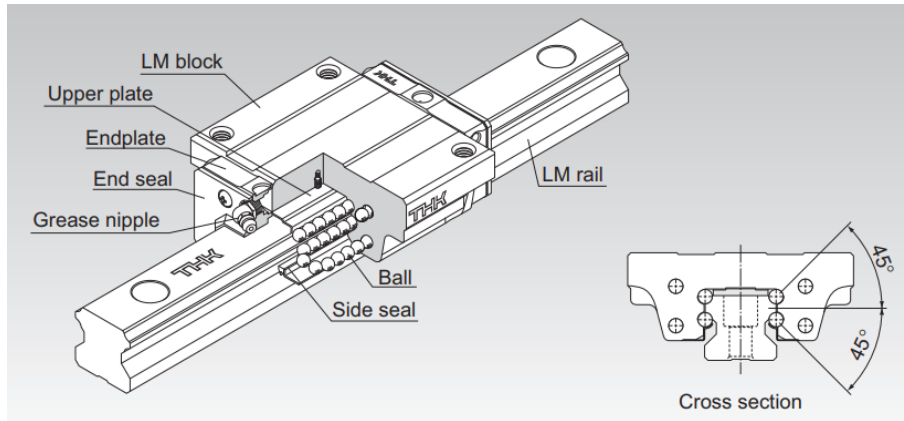
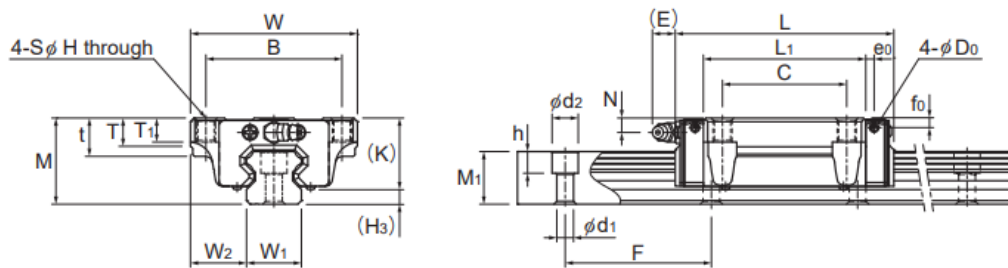


Figura 3.40: Sistema de Funcionamento da Guia HSR15 [13]

Como o suporte que fixa o a fresadora da CNC foi encaixado diretamente nesta guia linear, optou-se por este modelo com uma maior área de contacto entre o carrinho e o suporte e a utilização de 4 parafusos M5 em vez dos M4 utilizados para o eixo Y. Isto permitiu, apenas com uma guia linear, ter um conjunto do eixo Z bastante sólido e com uma montagem simples. Na figura 3.41 são apresentadas as dimensões do sistema e também alguns dados técnicos da guia.



Models HSR15 to 35C/LC/CM/LCM

Model No.	Outer dimensions			LM block dimensions											Pilot hole for side nipple				
	Height	Width	Length	B	C	S	H	L ₁	t	T	T ₁	K	N	E	Grease nipple	e ₀	f ₀	D ₀	H ₃
	M	W	L																
HSR 15C HSR 15CM	24	47	56.6	38	30	M5	4.5	38.8	11	7	7	19.3	4.3	5.5	PB1021B	3.2	3.9	3	4.7
LM rail dimensions						Basic load rating		Static permissible moment kN•m *					Mass						
Width	Height	Pitch	Length*	C	C ₀	M _A		M _B		M _C	LM block	LM rail							
W ₁ ±0.05	W ₂	M ₁				F	d ₁ × d ₂ × h	Max	kN	kN			1 block	Double blocks	1 block	Double blocks	1 block	kg	kg/m
15	16	15	60	4.5 × 7.5 × 5.3	3000 (1240)	10.9	15.7	0.0945	0.527	0.0945	0.527	0.0998	0.2	1.5					

Figura 3.41: Dados Técnicos da Guia HSR15 [13]

3.2.10 Makita RT0702C

A Makita RT0702C é uma fresadora compacta bastante utilizada para trabalhos manuais de fresagem, cortes, desbaste, gravura, polimento em materiais como a madeira, o plástico e o metal. Esta fresadora, devido às características apresentadas de seguida, é também bastante utilizada em projetos DIY de fresadoras CNC, tal como é o caso deste projeto.



Figura 3.42: Makita RT0702C [14]

A Makita RT0702C é uma das opções mais equilibradas relativamente às capacidades que têm em relação ao seu preço, de aproximadamente 160 €. Existem várias opções no mercado que para apenas trabalhar madeira seriam suficientes, mas para trabalhar metais como o alumínio, é importante este motor ser robusto e ter algumas das seguintes características [14]:

- A fresadora têm uma potência de 710 watts, suficiente para maquinar materiais mais duros como o alumínio, mas sem fazer muita poluição sonora.
- As rotações da máquina variam entre as 10000 RPM e as 34000 RPM, sendo o limite inferior o mais importante para a escolha desta fresadora, pois a velocidade de corte do alumínio tipicamente utilizada é de aproximadamente 11000 RPM. Grande parte das fresadoras do mercado ou não possuem ajuste de velocidade, ou têm um limite inferior na ordem das 16000 RPM. A rotação variável é ajustada num potenciómetro da máquina, visível na figura 3.42, permitindo ao utilizador ajustar a velocidade da ferramenta de acordo com a natureza do trabalho e possibilitando uma melhoria futura da CNC para controlo automático desta velocidade consoante o especificado no Gcode.
- A fresadora pode ser equipada com pinças de 6 e 8 mm de diâmetro, o que oferece mais flexibilidade para trabalhar com diferentes tamanhos de fresas.
- A capacidade máxima de corte da fresadora na madeira é de 35 mm de altura, embora para materiais mais duros como o alumínio seja aconselhado utilizar um passo vertical inferior a metade da altura de trabalho da fresa.
- A máquina pesa cerca de 1.8 kg, o que diminui o esforço realizado na estrutura e nos motores da CNC. Grande parte das restantes opções do mercado, com estas características técnicas, têm dimensões maiores e um peso superior a 3 kg.
- O formato cilíndrico da fresadora, com 65 mm de diâmetro, é também um ponto positivo em comparação com algumas das outras opções pois permite uma aplicação mais simples na CNC.

Devido a estas características, esta fresadora foi a escolha mais indicada para a aplicação deste projeto, oferecendo a robustez e os ajustes necessários para maquinar materiais mais duros com uma boa qualidade, como se pode verificar no capítulo 5.

3.3 Hardware Elétrico

3.3.1 Circuito Elétrico

Conforme foi discutido na seção 3.2, a CNC vai ser composta por 4 motores de passo Nema 17, sendo que 2 controlam o eixo Y, 1 controla o eixo x, e o último controla o eixo Z. Para controlar estes motores vai ser utilizado um Arduino Uno Rev3 em conjunto com um CNC Shield e 4 drives DRV8825, que em conjunto vão enviar os impulsos necessários para controlar o sistema. Por fim, o circuito elétrico da CNC, apresentado na figura 3.43, é ainda composto por uma fonte de tensão de 24 V responsável por alimentar os motores da CNC.

Foram também incluídos 2 interruptores em série no circuito de alimentação, sendo um responsável por ligar o circuito e o outro é utilizado como botão de emergência que corta a alimentação aos motores.

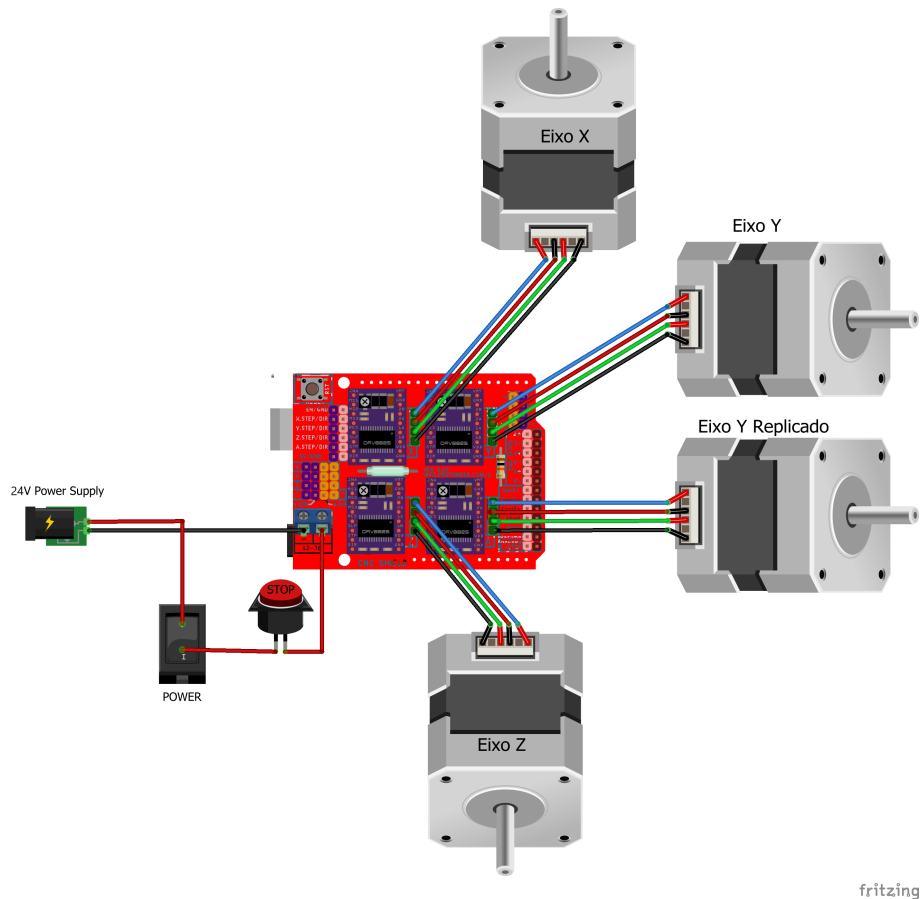


Figura 3.43: Circuito Elétrico CNC

3.3.2 Fonte de Alimentação

Tal como foi referido anteriormente, para alimentar os motores da CNC é utilizada uma fonte de tensão de 24 V, que vai ser ligada diretamente ao CNC Shield. Segundo o datasheet e a curva de funcionamento dos motores Nema 17 59 Ncm [10], a tensão ótima de funcionamento destes motores é de 24 V, o que permite manter um binário elevado nos motores sem recorrer a correntes tão elevadas.

Também para estes motores, a corrente máxima recomendada é de 2 A por motor, o que significa que numa situação em que os 4 motores da CNC estejam em esforço máximo, a fonte de tensão teria de ser capaz de debitar 8 A.



Figura 3.44: Fonte de Tensão

Desta forma, para alimentar os motores deste projeto foi utilizada uma fonte de tensão de 24 V e 10 A, apresentada na figura 3.44. A fonte utilizada é construída pela Kingwen Electronics Co. Ltd, uma empresa sediada na China que produz vários componentes eletrónicos.

Esta fonte de tensão pode ser alimentada com uma tensão alternada entre 100-240 V a uma frequência de 50/60 Hz, desta forma pode ser diretamente alimentada da rede elétrica doméstica ligando o cabo positivo, negativo e o GND à fonte nas respetivas posições. A fonte tem uma eficiência energética superior a 85 % quando trabalha em temperaturas entre -10 °C e os 60 °C. Possui também proteções de sobrecarga, curto-circuito e sobretensão.

3.3.3 Arduino Uno Rev3

O Arduino Uno Rev3 é uma placa de desenvolvimento eletrónico de código aberto que possui o microcontrolador ATmega328P como base [21] [22]. Considerado um dos modelos mais populares da plataforma Arduino, destaca-se pela facilidade de uso e baixo custo.

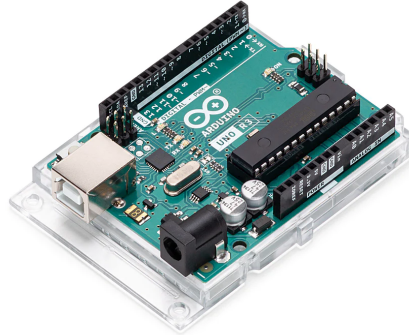


Figura 3.45: Arduino Uno Rev3 [15]

A placa é composta por 14 pinos digitais de entrada/saída (GPIOs), dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM (Pulse Width Modulation), que pode ser utilizado para controlar servo-motores, LEDs e motores DC de forma mais precisa. A placa possui ainda 6 entradas analógicas. O Arduino possui um conector de energia e uma conexão USB para comunicação com o computador ou para alimentação. Algumas das características técnicas, retiradas do datasheet [15], são exibidas na tabela 3.4.

Características Técnicas	
Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5 V
Input Voltage (recommended)	7-12 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Tabela 3.4: Características Técnicas do Arduino Uno Rev3

A programação do Arduino Uno Rev3 é feita utilizando a linguagem de programação do Arduino, que é baseada em C/C++. O software de desenvolvimento do Arduino, chamado Arduino IDE, é gratuito e de código aberto e inclui um editor de código, um compilador e um carregador de programas. Na secção 4.1.1 vai ser utilizado o Arduino IDE para descarregar para o micro-controlador o firmware de controlo da CNC.

O Arduino Uno Rev3 é das placas de desenvolvimento mais utilizadas em projetos de eletrónica, robótica, aplicações de automação residencial e muitas outras áreas. A sua popularidade deve-se à compatibilidade com uma grande variedade de módulos e sensores disponíveis no mercado, o que o torna uma plataforma muito versátil e flexível, mas também ao baixo custo para um dispositivo tão completo.

3.3.4 CNC Shield

O CNC Shield V3 é uma placa de expansão projetada para ser utilizada em conjunto com o Arduino Uno Rev3, que foi desenvolvido para permitir o controlo de até 4 motores de passo a partir de um conjunto compacto como o da figura 3.46.

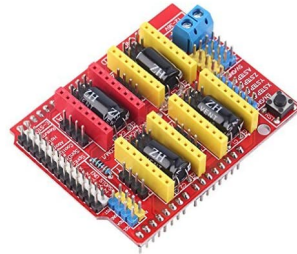


Figura 3.46: CNC Shield [16]

Na placa existem 4 slots para encaixar as drivers dos motores de passo [24]. Existem vários módulos de drivers compatíveis mas os mais utilizados com o CNC Shield são o A4988 e o DRV8825 [23]. No caso deste projeto foram utilizados os drivers DRV8825, como vai ver analisado na secção 3.3.5.

Algumas das principais características desta placa são:

- Tem capacidade para controlar 4 eixos independentes ou para replicar um dos eixos. No caso deste projeto foi replicado o eixo Y.
- Esta placa foi desenhada para ser totalmente compatível com o GRBL, que é um software open-source que interpreta o código G-Code e controla o movimento da CNC tirando partido do CNC Shield. Este é o firmware de controlo que vai ser utilizado neste projeto, como é discutido na secção 4.1.1.
- Tem capacidade para serem instalados 6 fins de curso, 2 para cada eixo.
- Tem a capacidade de fazer microstepping, ou seja diminuir o tamanho do passo do motor, a partir da conexão de alguns jumpers. A resolução dos microsteps varia de acordo com o driver utilizado, sendo a menor resolução possível 1/32 do passo normal do motor para o DRV8825.
- Os motores de passo bipolares podem ser ligados diretamente à placa utilizando os cabos molex de 4 pinos, que é a ligação típica destes motores.

Outras características podem ser verificadas no datasheet do produto [16].

Alimentação

A alimentação dos motores é feita diretamente no CNC Shield, que deve ser alimentado com uma tensão entre os 12 V e os 36 V, como foi verificado anteriormente neste projeto serão alimentados com 24 V.

Replicar Eixo

Como foi visto na secção 3.2.1, o eixo Y vai ser composto por dois motores que devem movimentar a estrutura ao mesmo tempo. Desta forma, o controlo de um dos motores do eixo vai ser replicado no CNC Shield. Para replicar o eixo, apenas foi necessário colocar 2 jumpers lado a lado, na posição indicada na figura 3.47.

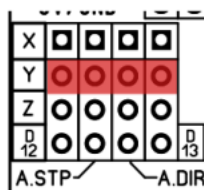


Figura 3.47: Replicar Eixo Y [16]

3.3.5 Controlador DRV8825

O DRV8825 é uma drive de motores de passo bipolares fabricado pela Texas Instruments, que tem um tamanho bastante reduzido e pode ser utilizado em conjunto com o CNC Shield. Este controlador é composto por pontes H formadas por transístores Mosfet de baixa resistência, que permitem controlar a corrente que passa no motor [17].

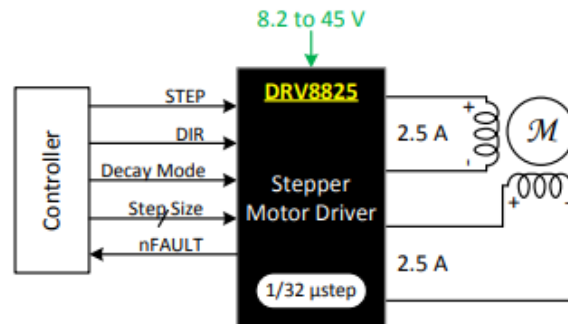


Figura 3.48: DRV8825 [17]

Algumas das principais características deste controlador são:

- Com a utilização de dissipadores de calor, este controlador suporta correntes de até 2,5 A, o que é superior à corrente de controlo da maioria dos motores de passo Nema17.
- A faixa de alimentação varia entre 8,2 V e os 45 V.
- Permite uma resolução de micro passos de 1/32, o que se traduz num controlo preciso e suave do motor. As várias resoluções são apresentadas na figura 3.49.
- O DRV8825 também possui proteção contra sobrecorrente, sobretensão e sobreaquecimento. Quando a corrente ou tensão do motor ultrapassa o limite definido, ou a temperatura atinge um limite máximo, o controlador desliga automaticamente a alimentação para evitar danos.

O DRV8825 é um substituto comum para o A4988, que é um controlador de motor de passo mais antigo e menos potente. Em comparação com o A4988, o DRV8825 possui algumas vantagens, como uma resolução de passo mais alta, um modo de baixo ruído, uma faixa de corrente maior e uma melhor dissipação de calor.

Configurar Micro-passos dos Motores

Na tabela apresentada na figura 3.49, retirada do datasheet [17], é possível verificar os vários modos de micro-passo que o DRV8825 permite utilizar para controlar os motores. Quanto menor for o passo, maior será a suavidade e exatidão do movimento do motor.

MODE2	MODE1	MODE0	STEP MODE
0	0	0	Full step (2-phase excitation) with 71% current
0	0	1	1/2 step (1-2 phase excitation)
0	1	0	1/4 step (W1-2 phase excitation)
0	1	1	8 microsteps/step
1	0	0	16 microsteps/step
1	0	1	32 microsteps/step
1	1	0	32 microsteps/step
1	1	1	32 microsteps/step

Figura 3.49: Tabela de Micro-Passos [17]

Como foi verificado na secção 3.2.3, o menor passo dos motores utilizados sem a utilização desta funcionalidade, seria de 1.8° . Neste projeto foi então optado por se utilizar uma resolução de 32 micro-passos por cada passo real do motor, ou seja, neste caso o passo mais pequeno que vai ser possível realizar vai ser 32 vezes menor, aproximadamente um passo mínimo de 0.06° .

Como se pode observar também na figura 3.49, existem 3 combinações que resultam na resolução pretendida. Neste caso foi escolhida a primeira opção, em que foi necessário ligar com 2 jumpers os pinos M0 e M2 do CNC Shield para cada motor, como pode ser verificado na figura 3.50.

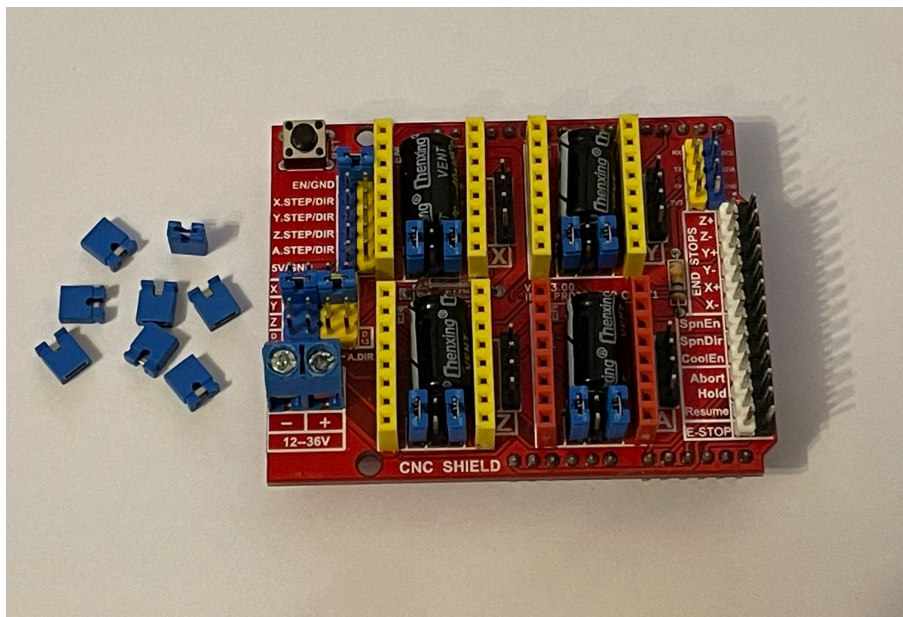


Figura 3.50: Jumpers CNC Shield

Nesta figura pode-se também observar as ligações feitas para replicar o eixo Y, utilizando 2 jumpers lado a lado como foi apresentado na figura 3.47.

Ajuste de Corrente Máxima do DRV8825

O DRV8825, tal como a maioria dos módulos de controlo de motores utilizados no CNC Shield, tem a possibilidade de ajustar a corrente máxima para se adequar ao motor utilizado. Este ajuste é feito num pequeno potenciómetro, que é indicado na figura 3.51 [25].

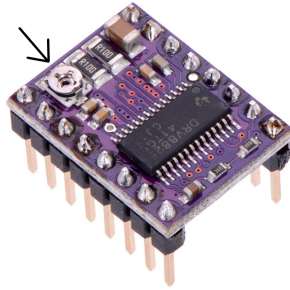


Figura 3.51: Potenciómetro DRV8825

Segundo o datasheet dos motores utilizados, a corrente de funcionamento máxima recomendada é de 2 A, então os controladores vão ser ajustados para este valor. Segundo o datasheet do controlador utilizado, a corrente é dada pela equação apresentada na figura 3.52 [17].

$$I_{\text{CHOP}} = \frac{V_{(\text{xREF})}}{5 \times R_{\text{ISENSE}}}$$

Figura 3.52: Equação Corrente DRV8825

Sendo a resistência RSense de 0,1 Ω segundo o datasheet, para o controlador ter um limite de corrente de 2 A vai ter uma tensão Vref de 1 V. É este valor que vai ser ajustado e medido com a ajuda de um multímetro até se atingir o valor desejado.

Para se realizar o ajuste é medida a tensão entre o GND e o potenciómetro, o que nos dá a tensão Vref. É aconselhado começar o ajuste com o potenciómetro rodado completamente no sentido horário, em que Vref = 0 V, e ir gradualmente rodando no sentido inverso até se obter o valor desejado, conforme é exemplificado na figura 3.53 [24] [25].

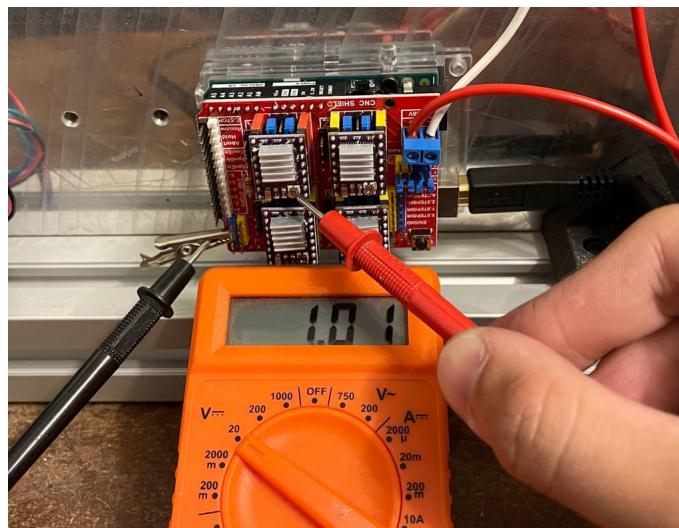


Figura 3.53: Ajuste de Corrente Máxima

Note-se que para fazer este ajuste é necessário ter o CNC Shield e o Arduino alimentados. Após se fazer este procedimento para cada drive, estas estão prontas para controlar os motores.

3.4 Custo Total do Sistema

Depois de descritos todos os componentes utilizados para o desenvolvimento desta CNC, pode-se agora discutir o custo total da sua construção.

Tal como foi referido na secção 3.1, para a construção desta CNC foi reaproveitada uma placa de alumínio de outro projeto anterior, foi também reutilizada a guia linear do eixo Z, e foram utilizados outros componentes que são comuns numa oficina sem necessidade de os adquirir, como os parafusos e porcas utilizadas. Uma estimativa para o custo destes componentes, e o local onde poderiam ter sido adquiridos, é apresentado na tabela 3.5.

Item	Vendedor	Preço
Placa de alumínio 420x300x10	MetallEhrnsberger	78 €
Guia Linear 200 mm + carrinhos HSR15 equivalentes	Amazon	40 €
Kit Parafusos + Porcas M3 (720 und)	Amazon	15 €
Kit Parafusos + Porcas M4 (480 und)	Amazon	15 €
Kit Parafusos + Porcas M5 (360 und)	Amazon	15 €
10 Parafusos M8 20mm	Amazon	3 €
M4 T-Slot Nut 40 Series (50 und)	Amazon	15 €
M3 T-Slot Nut 30 Series (50 und)	Amazon	14 €
	Custo Total	194 €

Tabela 3.5: Custos Itens em Stock

O custo total apresentado na tabela não corresponde na verdade ao valor real, uma vez que foram selecionados kits com mais unidades do que seriam necessário de forma a obter um custo unitário inferior. É também por esta razão que este valor foi isolado do restante custo da CNC.

Na tabela 3.6 é então apresentado o custo de cada componente que foi necessário comprar para o projeto, o local onde foi adquirido e o custo final da CNC que foi de 577 €. Caso fosse necessário comprar os componentes referidos na tabela 3.5, o custo da máquina seria de 771 €.

Item	Vendedor	Preço
Perfil de alumínio 40x40	ADAJUSA	43 €
Perfil de alumínio 30x60	ADAJUSA	13 €
2 Guias Lineares HGR15 400 mm + 4 HGH15CA	Amazon	54 €
2 Guias Lineares MGN12 300 mm UNITAK3D	Amazon	56 €
2 Fusos 400 mm + Porca de Bronze + Acoplamento	Amazon	27 €
2 Fusos 350 mm + Porca de Bronze + Acoplamento	Amazon	26 €
Acoplamentos Rígidos	Amazon	9 €
2 kg Prusament Galaxy Black	prusa3d	60 €
4 Motores de Passo NEMA 17 59 Ncm	Amazon	50 €
Fonte de Alimentação 24 V 10 A	Amazon	26 €
Arduino Uno R3 Original	Amazon	29 €
CNC Shield Board	Amazon	5 €
Stepper Motor Drive DRV8825 (5 und)	Amazon	16 €
Makita RT0700C	Amazon	163 €
	Custo Total	577 €

Tabela 3.6: Custo total do Sistema

Capítulo 4

Análise do Software/Firmware

4.1 GRBL

GRBL é um firmware gratuito e open-source, que foi desenvolvido para controlar movimentos de uma fresadora CNC. Este firmware é compatível com placas de desenvolvimento que utilizem o microcontrolador Atmega 328. O Arduino Uno é um dos exemplos mais conhecidos que utiliza este chip, como se pode observar na figura 4.1. Esta alternativa permite controlar vários tipos de máquinas CNC de 3 eixos, a partir destes dispositivos de baixo custo.

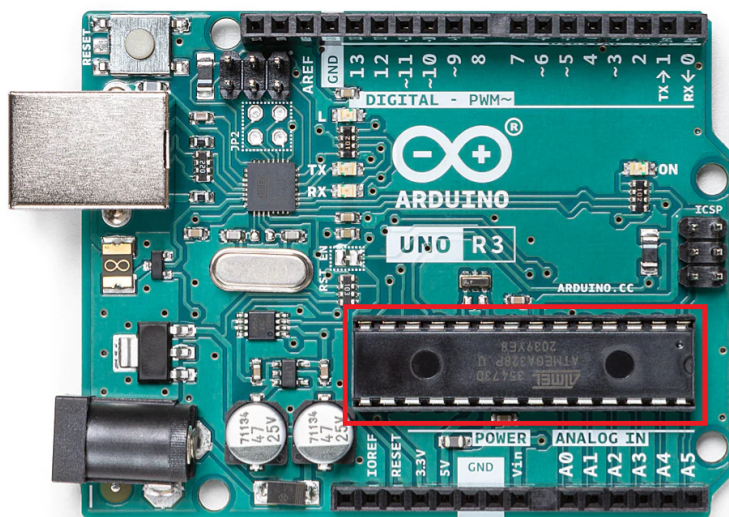


Figura 4.1: ATmega328 Arduino Uno Rev3 [15]

Sendo open-source, o seu código-fonte está disponível gratuitamente para download e modificação, permitindo que os utilizadores personalizem o comportamento do firmware para atender às necessidades das suas aplicações.

Este firmware foi criado por Simen Svale Skogsrud, um programador norueguês formado na Universidade de Oslo, e foi apresentado ao público em 2009. Desde 2011 o firmware está a ser mantido e atualizado no GitHub pelo Engenheiro Aeroespacial Americano Sungeun K. Jeon [26].

Segundo os desenvolvedores, o código do firmware é escrito em C de forma otimizada e utiliza quase na totalidade as capacidades do chip Atmega328p para manter a precisão e permitir executar várias operações ao mesmo tempo. O firmware, em conjunto com um Arduino Uno, permite obter frequências de pulsos de controlo dos motores de até 30 kHz sem perda de dados, o que resulta em movimentos suaves e precisos na CNC.

A principal função do GRBL é interpretar os comandos G-code [26], utilizados universalmente para controlar este tipo de máquinas como foi visto na secção 2.2.1, e converter esses comandos em sinais elétricos que são enviados aos motores da máquina, que possibilitam movimentar a ferramenta de forma

a maquina uma determinada peça. Os comandos G-code são enviados pelo software de controlo da máquina CNC, que neste projeto será o Universal Gcode Sender.

O GRBL permite então, para além do controlo dos eixos, ajustar parâmetros como a velocidade e aceleração dos motores da máquina, controlar rotação de um motor de fresagem, controlar um sistema de refrigeração, utilização de sensores de fim de curso para definir os limites da máquina, entre outras opções que permitem personalizar a operação da máquina CNC de acordo com as necessidades do utilizador. Todas estas configurações são feitas através do envio de G-codes específicos para estes efeitos. Na secção 4.2.2 vai ser demonstrado como configurar a máquina a partir do UGS, que comunica com este firmware a partir de comandos G-code.

4.1.1 Instalação do Firmware

Antes de se proceder à instalação no micro-controlador, devemos fazer o download da pasta comprimida do GRBL na sua página oficial no github, e de seguida extrair todos o ficheiros.

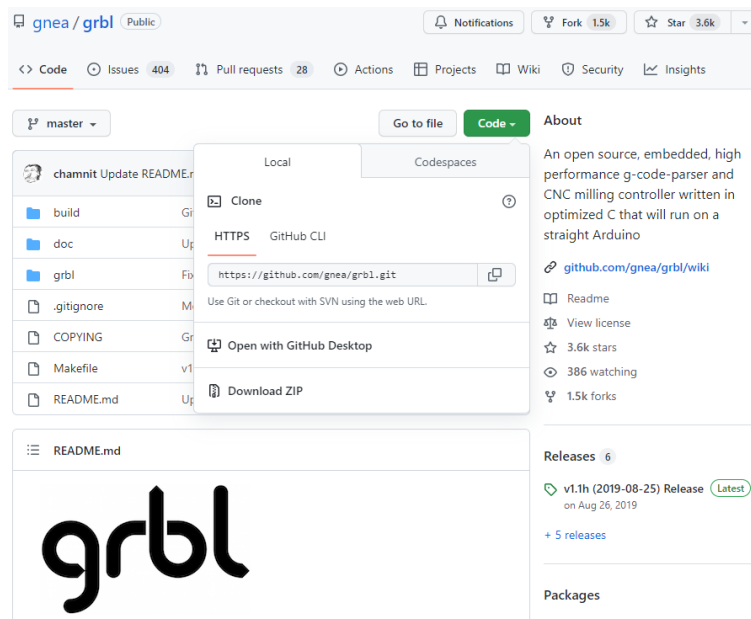


Figura 4.2: Download grbl

A instalação do firmware GRBL no Arduino Uno é feita a partir do Arduino IDE, o software de programação oficial deste micro-controlador. Depois de abrir o software, deve-se adicionar a biblioteca clicando em "Add .ZIP Library", como é demonstrado na figura 4.3. No explorador de ficheiros é necessário navegar até à localização da pasta "grbl-master", que se encontra na pasta que foi descomprimida anteriormente, seleccionar a pasta "grbl" e abrimos o ficheiro.

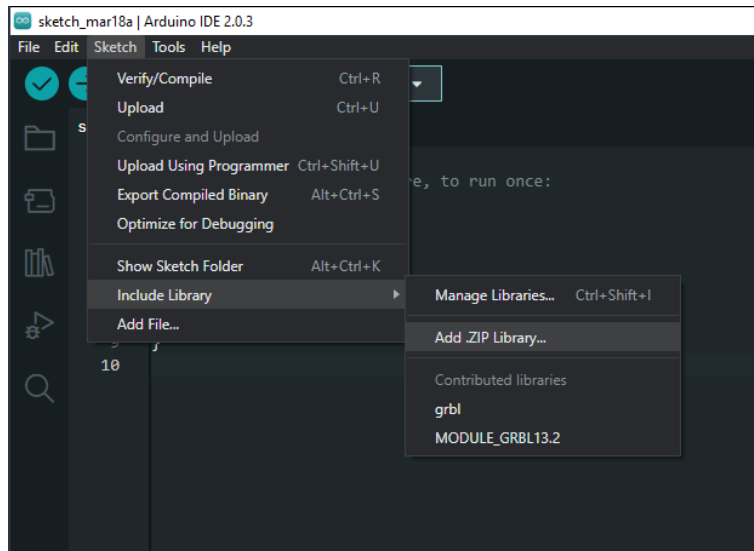


Figura 4.3: Adicionar Biblioteca grbl

Agora é necessário de fazer o upload do firmware no Arduino que vai ser utilizado para controlar o sistema. Para isto, é necessário navegar até "grblUpload" como é demonstrado na figura 4.4 e vai ser aberto um sketch novo com ligação à biblioteca do GRBL. Agora, depois de se conectar o Arduino a uma entrada USB, faz-se finalmente o upload do sketch [21].

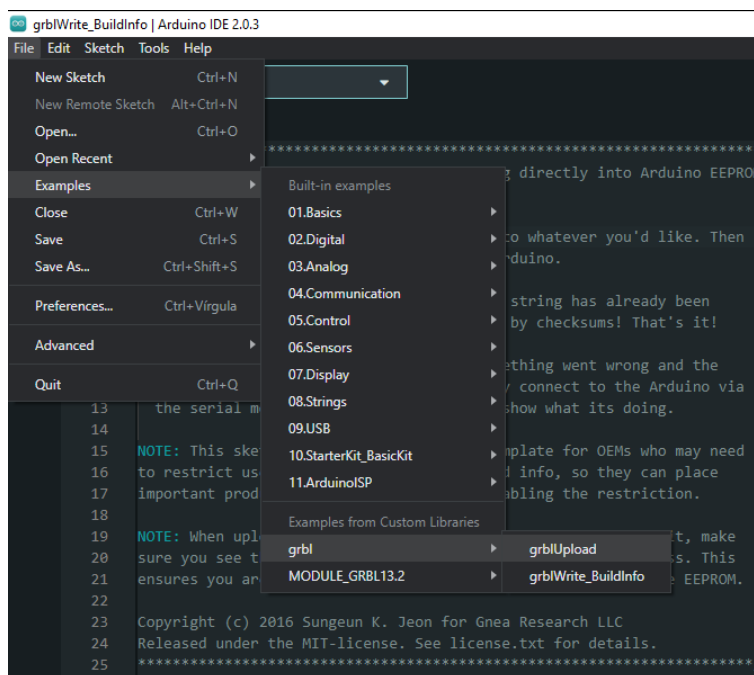


Figura 4.4: Upload do Firmware no Arduino

4.2 UGS - Universal Gcode Sender

O Universal Gcode Sender (UGS) é um software livre e de código aberto utilizado para enviar comandos Gcode para máquinas CNC. CNC é uma abreviação para "Controle Numérico Computadorizado", que é um processo de fabricação automatizado no qual a máquina segue um conjunto de instruções codificadas em Gcode para realizar um determinado trabalho [27].

O Gcode é uma linguagem de programação utilizada para controlar o movimento das máquinas CNC. Ele é composto por uma série de comandos que indicam à máquina como se mover, qual ferramenta usar, qual velocidade e taxa de alimentação usar, entre outras coisas. Os comandos Gcode são escritos em um arquivo de texto simples e carregados na máquina CNC.

O UGS oferece uma interface gráfica que permite carregar arquivos de modelo 3D, visualizar a simulação do caminho da ferramenta e enviar comandos Gcode para a máquina CNC. O UGS é capaz de comunicar com diferentes tipos de máquinas CNC e pode ser usado em sistemas operativos Windows, Mac e Linux.

Além disso, o UGS oferece vários recursos, como controlar em tempo real a posição da máquina, ajuste da velocidade de movimento, visualização do tempo estimado de conclusão da tarefa e muito mais. Este software é uma ferramenta muito útil para quem trabalha com máquinas CNC, pois permite controlar a máquina de forma precisa e eficiente.

Em resumo, o Universal Gcode Sender é um software livre e de código aberto que permite enviar comandos Gcode para máquinas CNC, tornando o processo de fabricação automatizado mais eficiente e preciso.

4.2.1 Instalação do Software

Para instalar o UGS deve-se fazer o download do software diretamente da sua página oficial, escolhendo o respectivo sistema operativo. Depois de transferido, devemos descomprimir a pasta e abrir o ficheiro executável "ugsplatform" para iniciar o software [27].

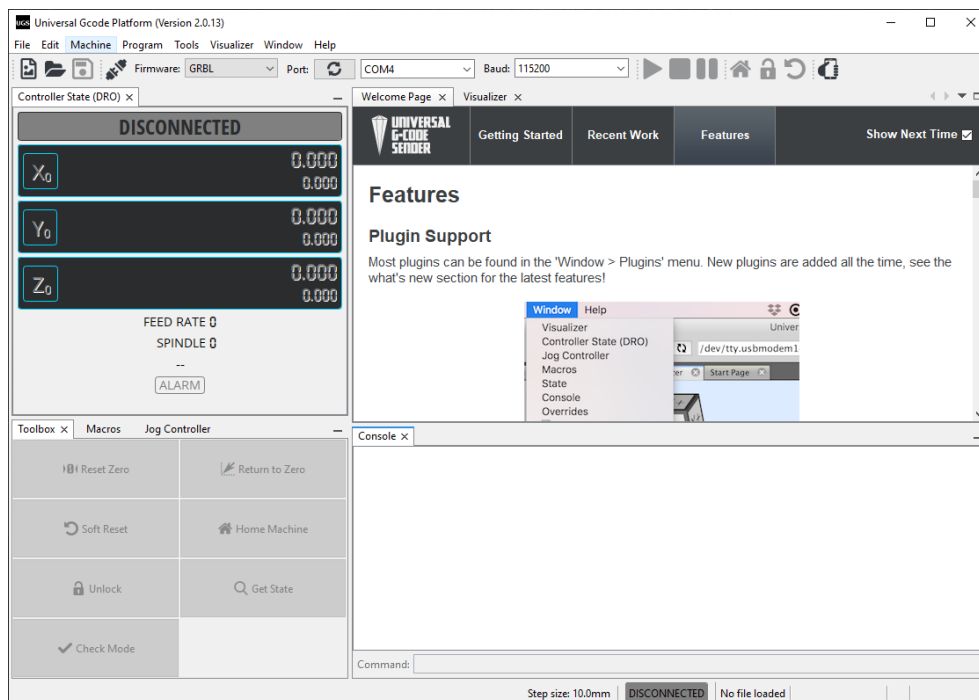


Figura 4.5: Ecrã Principal do UGS

4.2.2 Setup da CNC

Já com o firmware instalado no arduino, e o software de controlo funcional, vai-se agora proceder ao setup da CNC. Este passo vai ser feito utilizando o Setup Wizard do UGS, que se encontra na aba "machine". Para este passo precisamos de ter o sistema elétrico e mecânico da CNC concluídos, pois vai ser necessário movimentar cada eixo individualmente. Depois de conectar a CNC, utilizando um cabo usb do arduino ao PC, deve-se definir a Port rate tipicamente nos 115200, que significa uma capacidade de transferência máxima de 115200 bits por segundo, e de seguida seleccionar a porta onde o cabo está conectado.

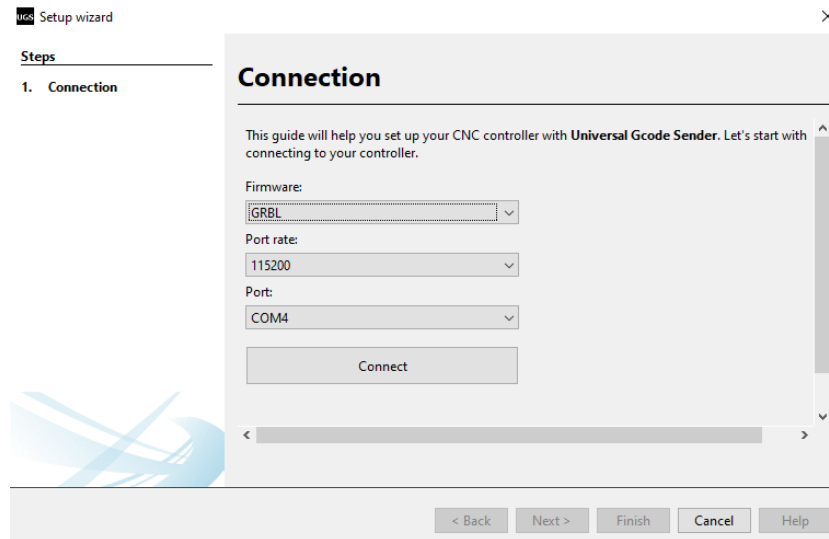


Figura 4.6: Conexão da CNC ao UGS

Depois do arduino estar conectado, é pedido pelo wizard, como se pode verificar na figura 4.7, que definamos os sentidos positivos dos motores. Para isto devemos clicar nos sentidos positivos de rotação e verificar se os eixos estão a ir para a direção que consideramos como positiva, caso isso se confirme podemos verificar o próximo eixo sem modificar nada. Caso o eixo se mova no sentido contrário, podemos mudar a direção manualmente trocando a posição dos cabos do motor de passo, ou mudar diretamente no software seleccionando a opção "Reverse direction".

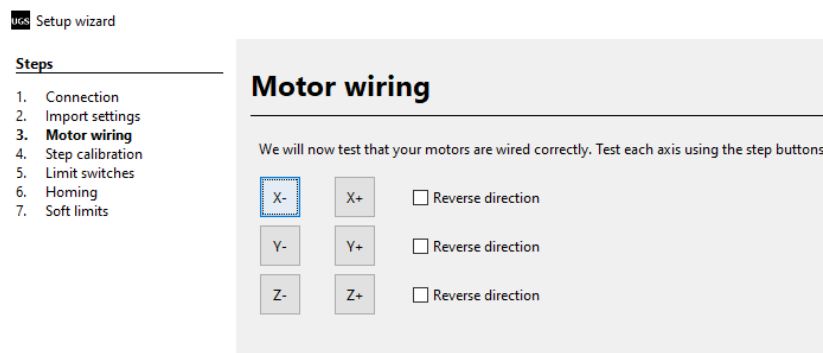


Figura 4.7: Sentidos de Rotação dos Motores

Seguidamente é feita a calibração dos passos dos motores da CNC. Note-se que este passo é dos mais importantes para este tipo de máquinas, uma vez que é o ponto onde vamos "dizer" aos motores quantas voltas precisam de dar para a ferramenta percorrer uma determinada distância. Seja na maquinação ou na impressão 3D, obtermos uma peça com as medidas exatas é sempre dos pontos mais importantes, pois uma peça com medidas erradas pode na maioria das vezes não ser aproveitável e acabar por ser desperdício de tempo e material.

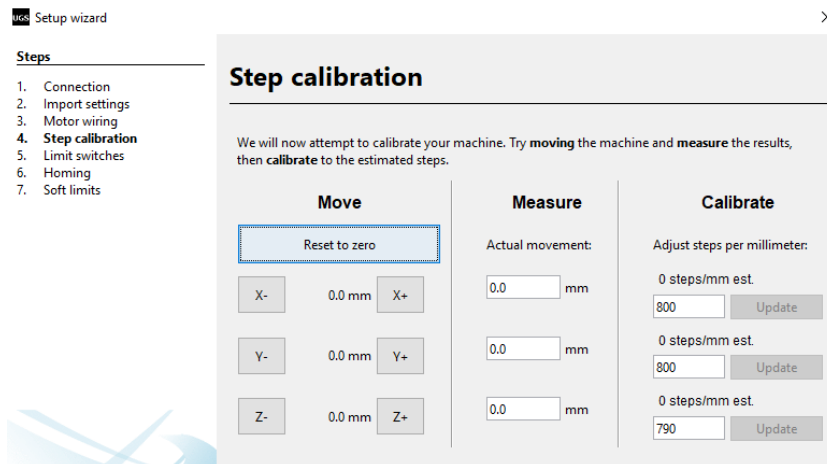


Figura 4.8: Calibração do Passo dos Motores

O valor de passos por cada milímetro, que deve ser colocado em cada eixo na aba "Calibrate", visível na figura 4.8, pode ser ajustado de 2 formas:

- Utilizando o valor teórico de passos que o motor teria de dar. Este valor iria depender do tipo de motor, da resolução de *microsteps* utilizada para os controlar e do tipo de transmissão utilizada para transformar movimento rotacional do motor em linear do eixo. Note-se que este valor pode por vezes não ser o correto na vida real, devido a variações na construção dos produtos entre outros fatores que possam afetar o funcionamento perfeito do sistema. Considerando os fusos utilizados a relação de transmissão que os eixos têm é de 8 mm/rotação, ou seja, para cada rotação do motor o eixo vai movimentar-se 8 mm. Para os motores utilizados em que o passo é de 1.8°, são necessários 200 passos para o eixo percorrer 8 mm, logo para percorrer 1 mm seriam necessários 25 passos. Note-se no entanto, que como foi discutido no capítulo 3 vai ser utilizado um *microstep* de 1/32 para controlar este motor, o que significa que serão necessários 800 *microsteps* para os eixos se movimentarem 1 mm.
- Ajustado experimentalmente com a ajuda do software. Neste caso, para cada eixo o utilizador pode movimentar o eixo uma determinada distancia teórica enquanto a mede com ajuda de uma régua ou paquímetro, quanto maior a distancia menor será o erro na calibração, e de seguida inserir a medida real da movimentação no campo para isso destinado. O valor correto para calibração, calculado pelo software, vai ser apresentado na caixa indicada na figura 4.9, onde o utilizador o deve inserir e de seguida clicar em *Update*.

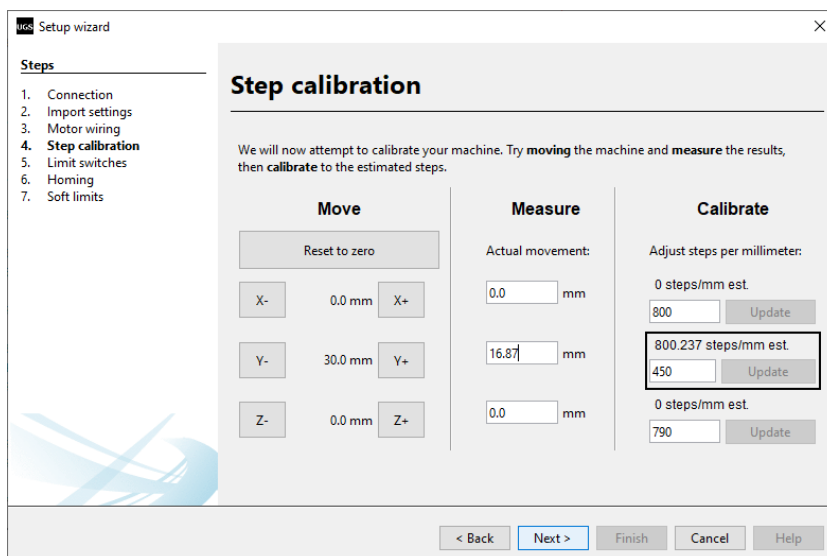


Figura 4.9: Calibração de Passo Experimentalmente

No caso da figura anterior, foi movimentado o eixo Y 30 mm teóricos, mas na realidade o eixo só se movimentou 16.87 mm. Colocando esse valor na caixa do valor medido, foi obtido um valor de aproximadamente 800 passos por cada milímetro.

Depois de se fazer este procedimento para os 3 eixos, a máquina está agora calibrada. Está então assim finalizado o *setup* da máquina. O programa tem ainda outras funcionalidades como os interruptores de fim de curso, que podem ser definidos durante este *setup*. No caso desta CNC, como não foram utilizados, este ponto não se vai aplicar.

4.2.3 Utilização do Programa

Depois de o *setup* estar concluído, já podemos começar a controlar a máquina. Para testar o funcionamento de todos os eixos, ou apenas para se levar a ferramenta para a posição desejada é utilizado o menu "Jog Controller" apresentado na figura 4.10. Este menu, que é bastante intuitivo, permite movimentar individualmente cada eixo a distancia definida em "Step Size" ao clicar no respetivo botão.

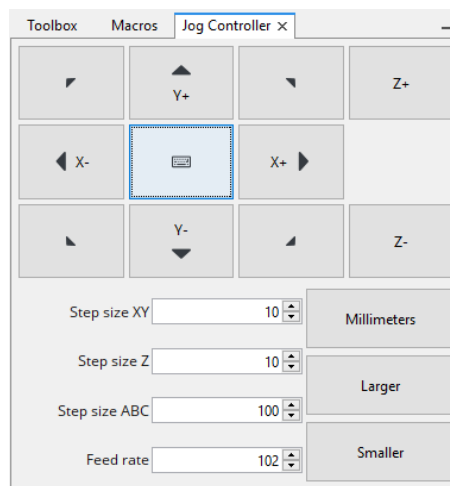


Figura 4.10: Controlo Manual CNC

O tamanho desse passo pode ser alterado e as unidades deste também podem variar entre polegadas ou mm. À medida que se movimenta a máquina, seja manualmente ou durante a maquinação de uma peça, podemos sempre verificar a posição absoluta da maquina em X, Y e Z no menu apresentado na figura 4.11.

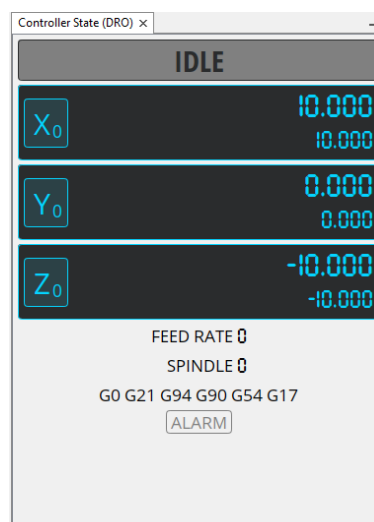


Figura 4.11: Posição Atual CNC

A posição da máquina é especialmente crítica para sabermos se esta se encontra na sua posição Zero

antes de iniciar um trabalho. Esta posição, no caso deste projeto, é definida manualmente. O utilizador deve levar a máquina até à posição inicial do programa, seja movimentando os eixos manualmente com a máquina desligada ou utilizando o UGS, e posteriormente deve clicar em "Reset Zero" no menu que é apresentado na figura 4.12.

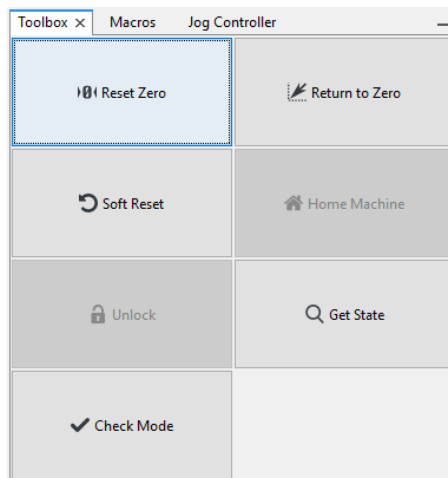


Figura 4.12: Posição Zero

Este menu permite também enviarmos a máquina para a posição que está definida como zero. Esta posição é das mais importantes pois todo o programa de maquinação de uma peça vai estar feito em relação a esta origem absoluta dos eixos da máquina.

Para que a CNC trabalhe no modo automático o utilizador deve abrir o ficheiro Gcode, que pode ser escrito num ficheiro de texto simples ou gerado por um software como o Fusion 360 CAM. O processo de criação do Gcode vai ser apresentado na secção 5.

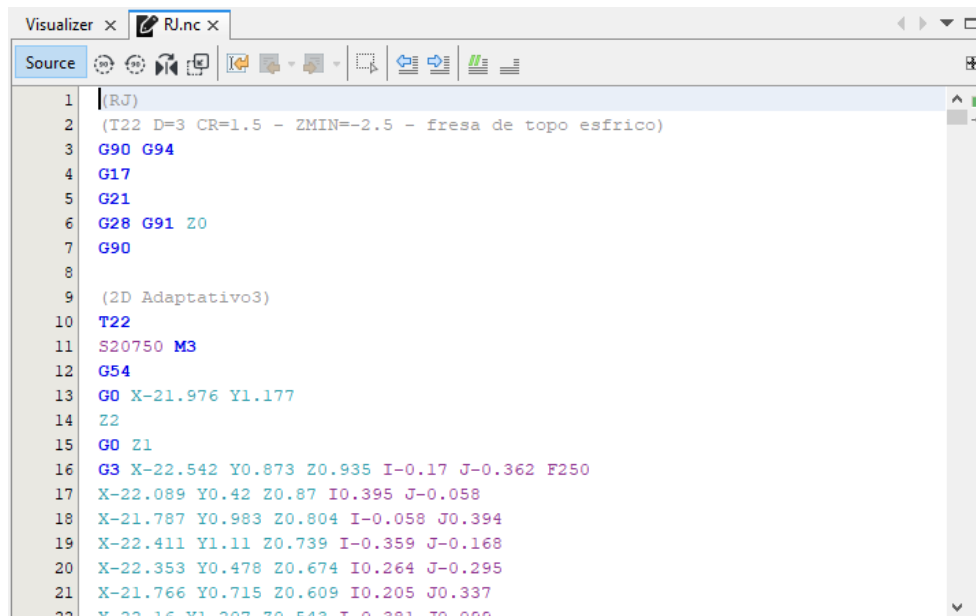


Figura 4.13: Code Viewer/Editor UGS

Como se pode observar na figura 4.13, o código do nosso programa pode ser observado ou editado diretamente do UGS. Isto é principalmente útil no caso de programas escritos manualmente, em que podemos ir testando o código para garantir que a máquina faz os movimentos pretendidos em vazio, ou seja sem a peça que queremos maquinar, e alterando o que for necessário.

Depois de salvarmos o código, os movimentos que a CNC vai realizar são apresentados no "Visua-

lizer” do UGS. Esta janela é interativa e permite observar em que posição se encontra a ferramenta da máquina nas 3 dimensões, então também pode ser útil para sabermos a camada em que se encontra. Na figura 4.14 pode ser observado os caminhos de maquinação de uma das peças de teste da máquina, que pode ser observada no capítulo 5.

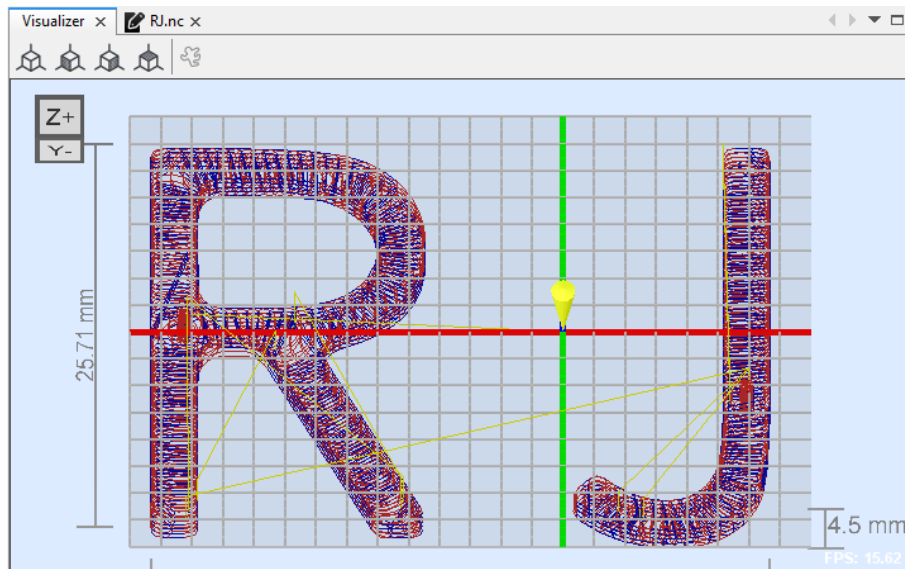


Figura 4.14: Visualizer UGS

Durante a maquinação, para além de vermos visualmente em que estado do processo a máquina se encontra, também são apresentados no canto inferior direito da janela o "Send Status", que é a linha de código atual em que a máquina se encontra em relação ao total de linhas, e o tempo atual de maquinação e uma estimativa do tempo restante.

Capítulo 5

Testes e Resultados

5.1 Fusion 360 CAM

O Fusion 360 CAM é um software de fabrico assistido por computador (Computer-Aided Manufacturing) desenvolvido pela Autodesk, que permite a criação de programas de maquinação para máquinas CNC. Esta funcionalidade está integrada no Fusion 360, um software de modelação 3D.

O software permite gerar trajetórias de ferramentas de maquinação, como fresadoras, tornos e máquinas de corte a laser, com base em modelos 3D criados anteriormente no Fusion 360 ou em outros softwares de modelação, como o Solidworks, que foi o utilizado para o projeto desta CNC.

Oferece ainda uma variedade de tipos de maquinação para atender às diferentes necessidades, possibilitando a criação de programas otimizados para uma produção eficiente de uma peça numa máquina automática. Alguns dos principais tipos de maquinação disponíveis no Fusion 360 CAM são:

Fresagem 2D: A fresagem 2D é usada para criar trajetórias de ferramentas em duas dimensões. É principalmente adequada para operações de fresagem simples, como perfuração, contorno, desbaste e acabamento em peças planas.

Fresagem 3D: A fresagem 3D permite criar trajetórias de ferramentas em três dimensões, permitindo a fresagem de superfícies complexas e contornos tridimensionais. Isso inclui operações como desbaste, acabamento e contornos livres.

Torneamento: O Fusion 360 CAM também oferece recursos de maquinação de torneamento. Essa estratégia é usada para operações de maquinação rotativa, onde a peça de trabalho é girada em torno de um eixo e a ferramenta de corte é movida ao longo da peça para criar formas cilíndricas, cónicas entre outras.

Furação: O modo de furação é utilizado para criar orifícios e roscas em peças. O software inclui vários tipos de furação, como furos simples, furos escalonados, furos helicoidais, roscas e muito mais.

Maquinação de cavidade: Esta funcionalidade é usada para criar trajetórias de ferramentas em cavidades ou rebaixes nas peças. É normalmente utilizada em operações de desbaste e acabamento em cavidades.

Maquinação de contorno: A maquinação de contorno é usada para criar trajetórias de ferramentas ao longo de contornos externos ou internos de peças. Ela pode ser usada para criar cortes, recortes ou cavidades numa peça.

Com o Fusion 360 CAM, os utilizadores podem ainda definir parâmetros de maquinação, como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tipo de ferramenta. O software simula virtualmente a maquinação, permitindo detetar colisões, erros e problemas antes de o utilizador enviar o programa para a máquina CNC.

5.2 Testes Realizados e Resultados Obtidos

5.2.1 Teste de dimensões

O primeiro teste realizado na CNC, após a sua construção e configuração, teve o propósito de conferir as dimensões reais de uma maquinação feita pela CNC. Para isto foi criado um código simples, em G-Code mas ainda sem a utilização do Fusion 360 CAM, que controlava a CNC de forma a maquinar um quadrado de 10x10 mm e com uma profundidade de também 10 mm. Na figura 2.5 foi apresentado um código similar ao feito para este teste, mas para uma profundidade de 2 mm.

Para o teste foi utilizada uma peça de Nylon, uma fresa com 4 mm de diâmetro e um avanço de 200 mm/min. Na figura 5.1 é apresentada a peça após a maquinação e as medidas nos respetivos eixos X e Y.



Figura 5.1: Teste Inicial de Dimensões

Note-se que, fazendo um movimento de 10x10 mm com o centro de uma fresa de 4 mm de diâmetro, resulta em ter um quadrado exterior de 14x14 mm após a maquinação. Na figura 5.1 pode-se verificar que a distância no eixo X ficou com uma excelente precisão, tendo um desvio de 0.02 mm da cota nominal. No caso do eixo Y o desvio foi de 0.12 mm, que embora não seja exagerado, é superior ao pretendido, então o valor da calibração dos passos do motor deste eixo, referida na secção 4.2.2, foi alterado consoante os valores obtidos neste teste, o que melhorou a precisão da CNC.

5.2.2 Teste de Maquinação em Nylon

O segundo teste realizado na CNC foi um teste mais complexo, sendo neste caso o objetivo maquinar totalmente uma peça a partir de um modelo 3D desenvolvido e um bloco de Nylon. O modelo 3D utilizado foi o de um componente já existente, que é adquirido a uma empresa profissional de maquinação, de forma a ter um termo de comparação após a maquinação da peça.

Na figura 5.2 pode se observar por trás o modelo 3D utilizado para a maquinação, e à frente o bloco de Nylon com os eixos de maquinação identificados.

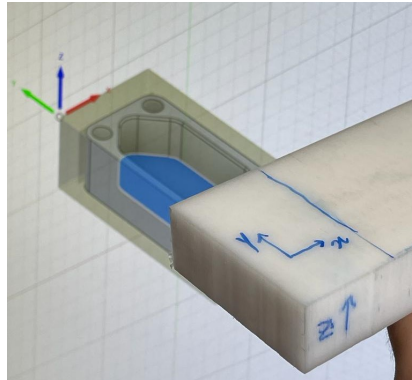


Figura 5.2: Modelo 3D e Bloco de Nylon Inicial

Depois de ser gerado o ficheiro G-Code no Fusion 360 CAM, com o tipo de maquinação e as definições pretendidas, o ficheiro é aberto no UGS tal como foi verificado no capítulo 4.2.3. Depois deve-se definir manualmente a posição zero da CNC, ligar a fresadora e dar início à maquinação do componente.



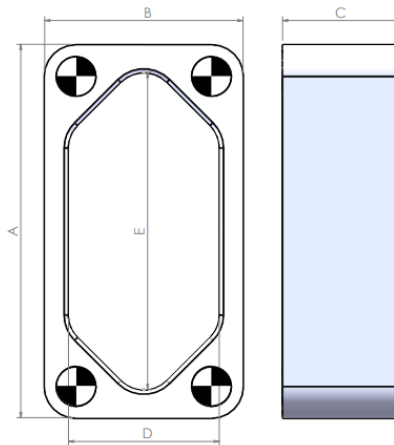
Figura 5.3: Teste de Maquinação em Nylon

No caso da maquinação de materiais plásticos como o nylon não é necessário a utilização de lubrificantes de corte, mas pode ser aconselhável ir limpando a fresa e a área a maquinar com ar comprimido. Na figura 5.3 pode-se observar a CNC no início da maquinação da peça e o resultado final. Note-se que a peça não foi maquinada na totalidade propositadamente, pois isso resultaria numa peça sem suporte nenhum e que poderia saltar, o que seria perigoso. Os restantes resíduos foram retirados manualmente.



Figura 5.4: Peça Maquinada na CNC Vs Peça Original

Na figura 5.4 é apresentada a comparação visual entre a peça maquinada pela CNC criada neste projeto e a peça do fornecedor. Embora a peça do fornecedor já tenha sido utilizada na sua aplicação, é possível verificar a qualidade da maquinação feita, tendo-se obtido um resultado bastante parecido ao "original" e com um acabamento quase perfeito. Na tabela 5.1 pode-se também observar os resultados das cotas mais importantes da peça fabricada em comparação com as dimensões reais.



Cota	Dimensão Real [mm]	Dimensão Obtida [mm]	Desvio [mm]
A	47	47.15	0.15
B	25	25.02	0.02
C	15	14.97	-0.03
D	19	19.01	0.01
E	40	39.98	-0.02

Tabela 5.1: Dimensões do Componente

Os resultados obtidos foram então bastante positivos e com desvios reduzidos. Isto permite verificar a capacidade da CNC para produzir peças em Nylon.

5.2.3 Teste de Maquinação em Alumínio

O principal objetivo do terceiro teste foi testar a capacidade da CNC a maquinar metais macios, neste caso o alumínio, de forma a comprovar se se tinham atingido os objetivos iniciais. Neste teste foi então utilizado um bloco de alumínio, onde seriam maquinadas as letras "RJ" tal como foi apresentado na figura 4.14. No caso dessa figura é apresentado o caminho que a ferramenta vai percorrer para maquinar as iniciais.

Para esta maquinação foi utilizada uma fresa de 3 mm de diâmetro e durante a maquinação foi-se adicionando lubrificante de corte para arrefecer a fresa. Seria também possível utilizar álcool para este efeito quando se está a maquinar alumínio. Na figura 5.5 pode-se observar a o bloco de alumínio durante a maquinação, mais concretamente durante a maquinação da primeira inicial a ser gravada na peça.

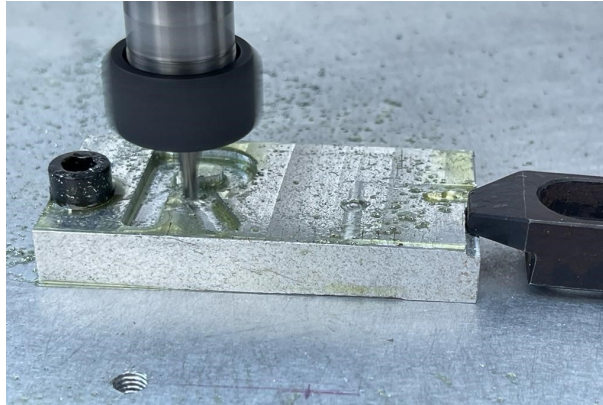


Figura 5.5: Teste de Maquinação em Alumínio

Note-se que no caso desta peça foi utilizado um modo de fixação diferente que trouxesse mais estabilidade ao bloco, uma vez que os esforços realizados durante a maquinação do alumínio são superiores aos do teste anterior.



Figura 5.6: Resultado da Maquinação

Na figura 5.6 pode-se observar o resultado da maquinação. As letras maquinadas ficaram com um acabamento de qualidade e constante ao longo da peça. Durante a maquinação também não se notou nenhum esforço ou empeno no sistema, o que levou a se considerar uma maquinação bem sucedida.

Capítulo 6

Conclusões e Melhorias Futuras

6.1 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho, tal como foi referido no capítulo 1, era o desenvolvimento de uma fresadora CNC de dimensão e custo reduzido, que permitisse maquinar plásticos e metais macios.

Os testes realizados com a CNC demonstraram que a máquina alcançou os objetivos definidos no projeto. O primeiro teste, focado em verificar as dimensões reais da maquinação, possibilitou uma calibração adequada dos passos do motor. O segundo teste, envolvendo a fresagem em nylon, foi a primeira peça completa e apresentou resultados positivos, com desvios reduzidos em relação às dimensões reais da peça. O terceiro teste, que contemplou a fresagem em alumínio, validou a capacidade da CNC de maquinar materiais metálicos macios, exibindo resultados consistentes e acabamentos de qualidade.

A CNC demonstrou ser uma máquina sólida e confiável, capaz de produzir peças com precisão e qualidade adequadas para diversas aplicações. A combinação de perfis de alumínio, guias lineares, motores de passo e uma estrutura impressa em 3D demonstrou ser eficiente, funcional e robusta para o objetivo. O sistema de controlo eletrónico simples, focado num Arduino em conjunto com um CNC Shield, proporcionou um sistema fiável e económico para o controlo da CNC.

Para o controlo da CNC, ao longo do projeto, procurou-se sempre utilizar *firmware/software Open-Source*, para o seu funcionamento não estar dependente de serviços de terceiro, restrições de contratos e permitir alterações técnicas futuras.

Com a devida manutenção e a implementação de melhorias futuras, a CNC tem o potencial de se tornar uma adição valiosa em ambientes de prototipagem, fabricação de *spare parts* e pesquisa, proporcionando um meio económico e eficiente para produzir peças com elevada qualidade e precisão.

6.2 Melhorias Futuras

Ao longo do processo de desenvolvimento do modelo 3D da máquina CNC, foram implementadas diversas modificações em relação ao plano inicial com o objetivo de melhorar seu desempenho, robustez e otimização das suas funções. Por exemplo, a escolha de utilizar perfis de alumínio na estrutura conferiu maior robustez, facilitou a montagem de componentes, e aumentou a área de trabalho. Também a utilização das drives DRV8825, em vez das tipicamente utilizadas em conjunto com o CNC Shield (A4988), permitiu utilizar uma faixa de trabalho dos motores com mais binário sem comprometer os componentes elétricos.

Para além das alterações implementadas durante o desenvolvimento da CNC, foram ainda identificadas algumas melhorias futuras para levar a máquina para um nível superior. Alguns destes pontos permitiriam melhorar a robustez e estabilidade da máquina, os outros simplificariam o modo de operar a CNC. As principais ideias de melhoria são apresentados de seguida:

- **Nema 23:** Os motores Nema 23 são mais robustos e potentes do que os motores Nema 17 geralmente usados em máquinas CNC DIY. Ao atualizar para motores Nema 23 e drivers mais potentes, a máquina ganhará mais binário e precisão nos movimentos, permitindo trabalhar com materiais mais resistentes e realizar operações mais complexas com um esforço menor.
- **Fusos de esferas:** Substituir os fusos T8 e as respetivas porcas de bronze por fusos de esferas permite melhorar significativamente a precisão e a suavidade dos movimentos da CNC. Os sistemas

de fusos com porcas trapezoidais de latão tendem a ganhar folga entre estes dois componentes, o que degrada a qualidade das peças maquinadas pela CNC ao longo do tempo se os componentes não forem trocados. Os fusos de esferas têm folga quase inexistente e menos atrito que os fusos utilizados, o que resulta em movimentos mais precisos, redução de vibrações e maior tempo de vida das mesmas. Estes sistemas estão no entanto associados a um maior investimento, e desta forma não foram considerados para a fase inicial deste projeto.

- **Sensores fins de Curso:** A utilização de sensores de fim de curso nos 3 eixos vai permitir que a máquina CNC faça uma auto-calibração e saiba exatamente a posição da ferramenta em relação à origem. Isto pode evitar colisões acidentais, garantir maior precisão nos movimentos e deixa de ser necessário o utilizador registar manualmente o zero da CNC a cada maquinação. Desta forma apenas é importante garantir que o bloco de material se encontra na posição correta em relação à origem da máquina.
- **Sistema de Aspiração** Implementar um sistema de aspiração localizado na zona da fresa pode ser extremamente útil para remover as aparas e resíduos gerados durante o processo de fresagem do material. Além de manter a área de trabalho limpa, um sistema destes melhora a visibilidade da peça durante a maquinação e prolonga a vida útil das ferramentas de corte. Também seria benéfico para componentes móveis da CNC como as guias lineares, os fusos, e os motores, uma vez que a intrusão de partículas nos seus sistemas poderá diminuir o seu tempo de vida.

Em suma, é importante perceber que todas estas melhorias envolvem um investimento adicional, consoante o tipo de utilização que vai ser dado à máquina, deve-se fazer uma avaliação de quais os pontos mais importantes a implementar na CNC. Para o objetivo deste trabalho projeto, com base no tipo utilização previsto e no custo de desenvolvimento pretendido, não se sentiu necessidade de implementar estes pontos na fase inicial.

Referências

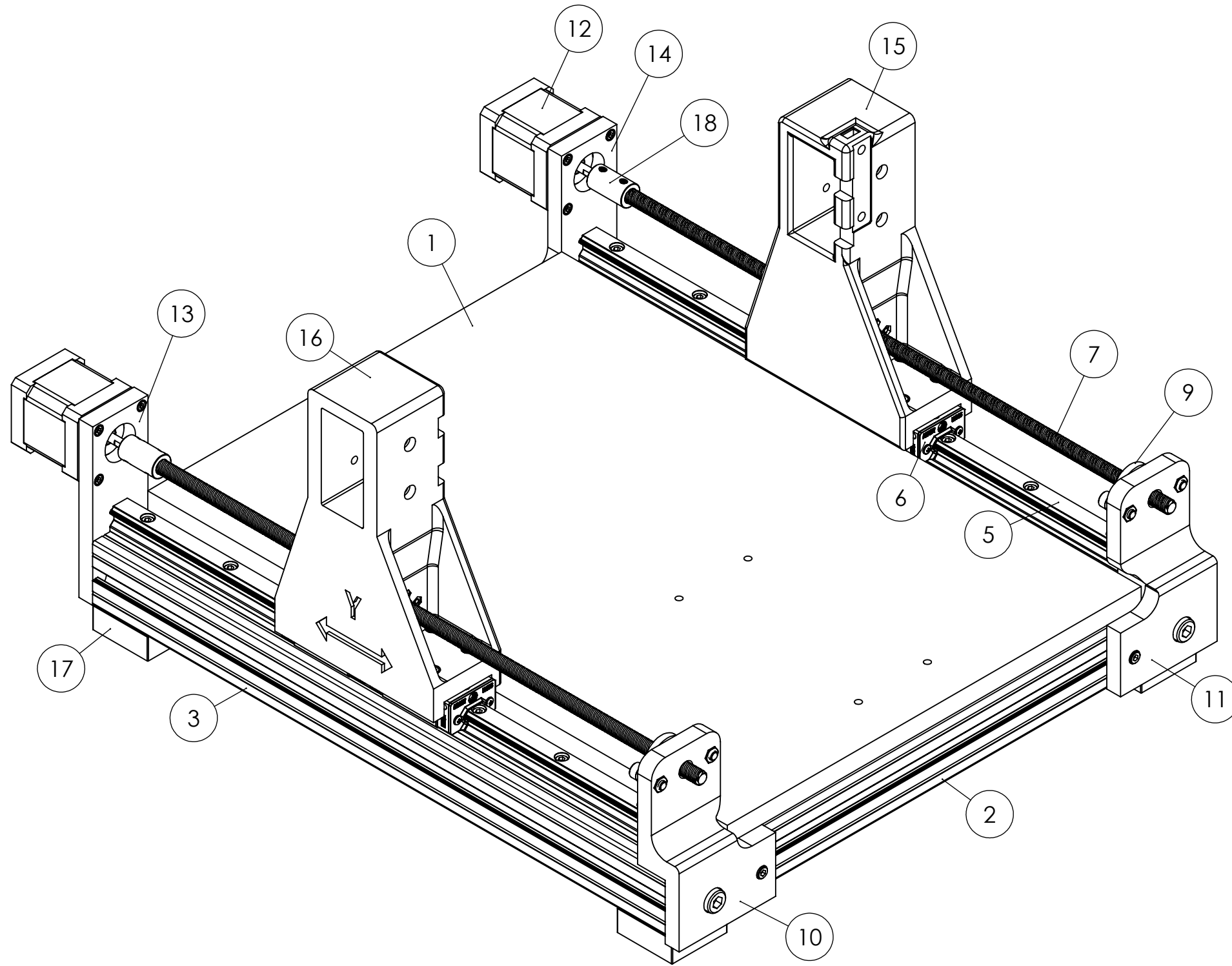
- [1] A. Domingues, *Fresagem Convencional*. engebook, 2021.
- [2] “Como usar uma fresadora vertical.” <https://www.manutencaoesuprimentos.com.br/como-usar-uma-fresadora-vertical/#gsc.tab=0>, Jun 2023.
- [3] R. G. Jasinevicius, “Processos de usinagem.” https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2036771/mod_resource/content/2/Aula%20Fresamento.pdf, Abr 2023.
- [4] B. Tools, “History of cnc machining.” <https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-1-2a4b290d994d>, Jun 2023.
- [5] I. Autodesk, *Fundamentals of CNC Machining*. 2014.
- [6] “Fresadora cnc: Tudo sobre a máquina.” <https://vemax.ind.br/blog/fresadora-cnc-tudo-sobre-a-maquina/>, Jun 2023.
- [7] “Fresadoras cnc haas.” https://www.haascnc.com/pt/shop/category/pricelist.html#tab_machines_0, Abr 2023.
- [8] “Creality ender-3 v2 user manual.” <https://img.staticdj.com/70e2f03e25b85b3e91addc52239dd624.pdf>.
- [9] A. Francisco, “Motores elétricos, 5ª edição,” *ETEP-Edições Técnicas e Profissionais*, 2013.
- [10] “Nema 17hs19-2004s1 datashet.” <https://www.omc-stepperonline.com/download/17HS19-2004S1.pdf>.
- [11] “Nema 17hs19-2004s1 torque curve.” https://www.omc-stepperonline.com/download/17HS19-2004S1_Torque_Curve.pdf.
- [12] “Linear guideways hiwin datashet.” <https://hiwin.co.uk/wp-content/uploads/2017/06/Linear-Guideways.pdf>.
- [13] “Lm guide global standard size model hsr datashet.” https://tech.thk.com/en/products/pdf/en_a01_180.pdf.
- [14] “Ficha técnica fresadora multifunções rt0702c.” https://www.makita.pt/data/sr/productinfo/generated/rt0702c_3.pdf.
- [15] “Arduino uno rev3 datasheet.” <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>.
- [16] “Az-delivery cnc shield v3 datasheet.” https://cdn.shopify.com/s/files/1/1509/1638/files/CNC-Shield_V3_Datenblatt.pdf?12861848950625246088.
- [17] “Drv8825 stepper motor controller datashet.” https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8825.pdf?ts=1689605217534&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [18] “Technical datasheet - prusament pla by prusa polymers.” <https://www.prusa3d.com/file/370474/prusament-pla-technical-data-sheet.pdf>.
- [19] All3DP, “Router cnc: as melhores fresadoras cnc de 2023.” <https://all3dp.com/pt/1/router-cnc-fresadora-cnc-maquina-cnc/>, Abr 2023.
- [20] Isaac, “Nema 17: tudo sobre o motor de passo compatível com arduino.” <https://www.hwlibre.com/pt/nema-17/>, Dez 2022.
- [21] P. Scherz and S. Monk, *Practical Electronics For Inventors*. Mc Graw Hill Education, 4 ed., 2016.

- [22] J. N. Pires, *Automação e Controlo Industrial, 1^a Edição*. LIDEL, 2019.
- [23] C. Dow, “Arduino cnc shield: All you need to know.” <https://all3dp.com/2/arduino-cnc-shield/>, Jan 2023.
- [24] Eletrogate, “Cnc shield: Guia prático e introdução ao grbl.” <https://blog.eletrogate.com/cnc-shield-guia-pratico-e-introducao-ao-grbl/>, Fev 2022.
- [25] “Tutorial: Arduino + drv8825 + motor de passo.” <https://jgamblog.wordpress.com/2016/09/24/tutorial-arduino-drv8825-motor-de-passo/comment-page-1/>, Fev 2016.
- [26] R. Lawless and N. Kaye, “Grbl software: All you need to know.” <https://all3dp.com/2/grbl-software-guide/>, Fev 2023.
- [27] L. Fuentes, “Universal gcode sender: The basics simply explained.” <https://all3dp.com/2/universal-gcode-sender/>, Mar 2023.

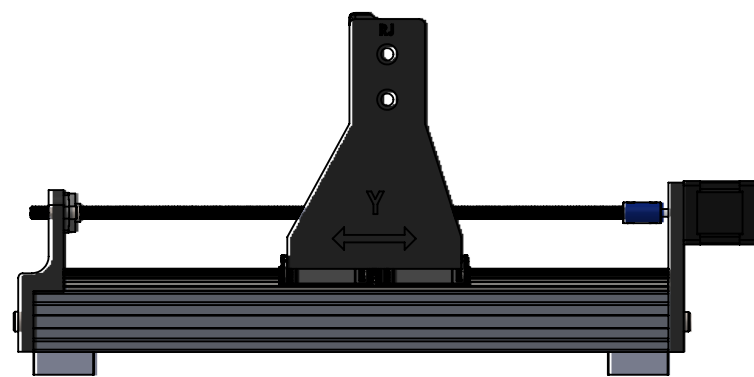
Anexo A


Desenhos Técnicos


1. Desenho Conjunto Eixo Y
2. Desenho conjunto Eixo X
3. Desenho conjunto Eixo Z
4. Modelo Completo CNC

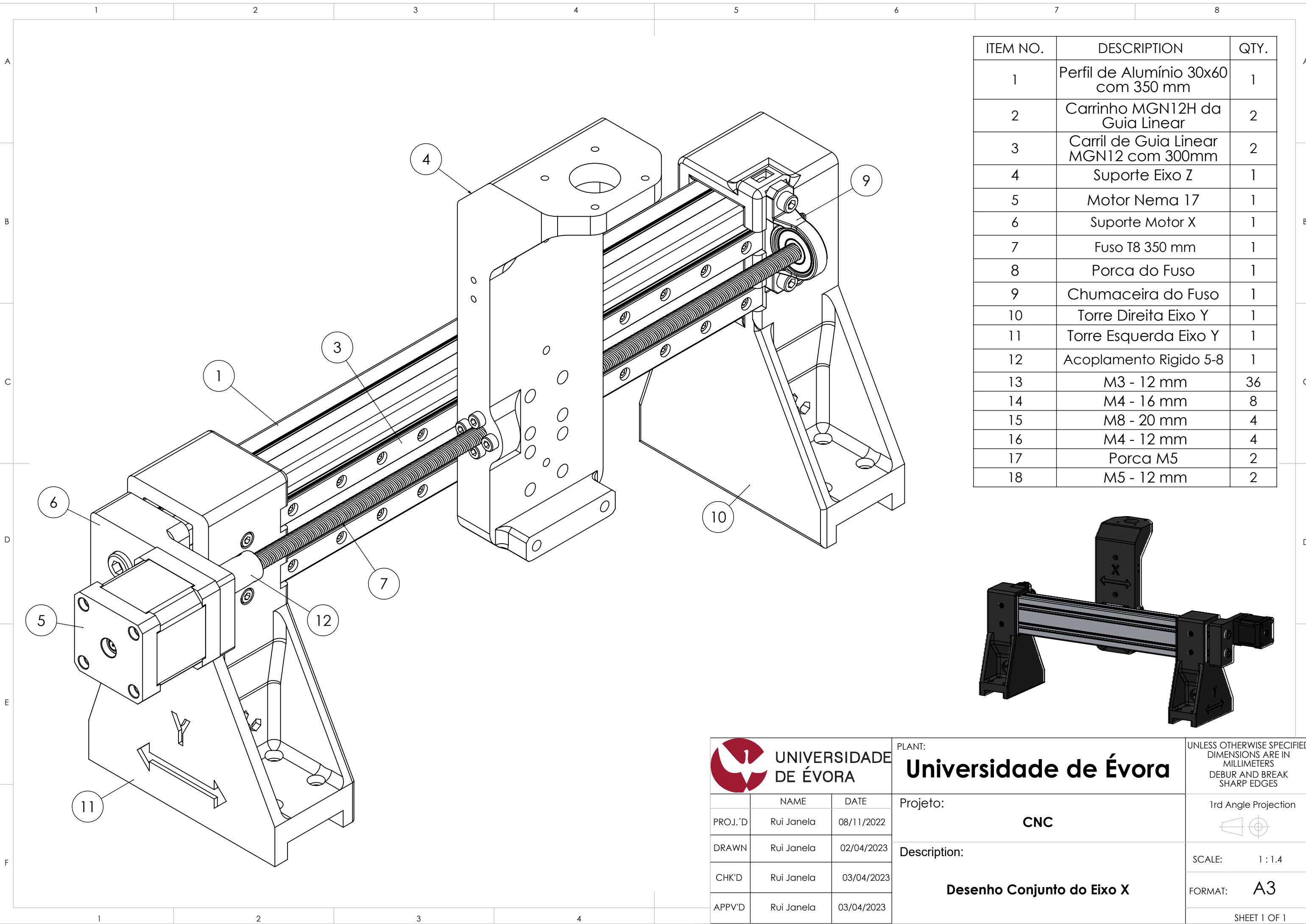


ITEM NO.	DESCRIPTION	QTY.
1	Base de Alumínio	1
2	Perfil de Alumínio 40x40 300 mm	2
3	Perfil de Alumínio 40x40 420 mm	2
4	Encaixes de Perfis Impressos	4
5	Carril HGR15R	2
6	Bloco Linear HGH15CA	4
7	Fuso T8 400 mm	2
8	Porca do Fuso	2
9	Chumaceira do Fuso	2
10	Suporte Chumaceira Esquerda	1
11	Suporte Chumaceira Direita	1
12	Motor Nema 17	2
13	Suporte Motor Y Esquerdo	1
14	Suporte Motor Y Direito	1
15	Torre Direita Eixo Y	1
16	Torre Esquerda Eixo Y	1
17	Pés Flexíveis	4
18	Acoplamento Rigido 5-8	2
19	M3 - 25 mm	8
20	M4 - 16 mm	24
21	M4 - 20 mm	14
22	M8 - 20 mm	4
23	M3 - 12 mm	8
24	M4 - 10 mm	16
25	M5 - 16 mm	4
26	Porca M3	8
27	Porca M5	4

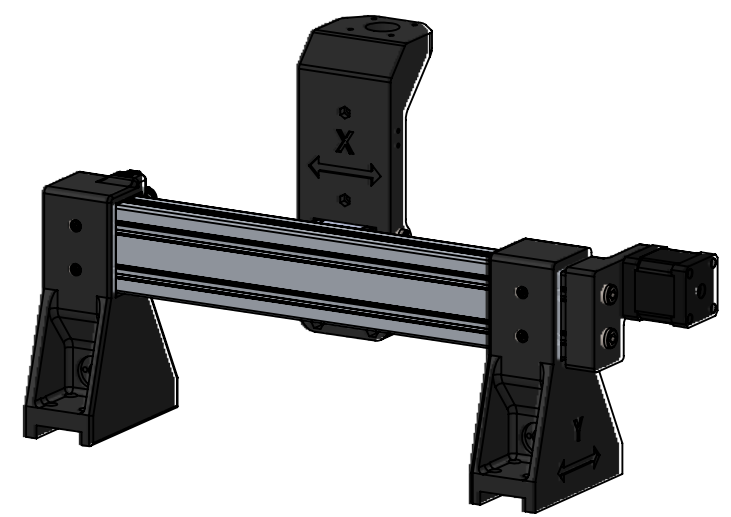


 UNIVERSIDADE DE ÉVORA		
PROJ.'D	Rui Janela	08/11/2022
DRAWN	Rui Janela	02/04/2023
CHK'D	Rui Janela	03/04/2023
APPV'D	Rui Janela	03/04/2023

PLANT:	Universidade de Évora	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS DEBUR AND BREAK SHARP EDGES
Projeto:	CNC	
Description:	Desenho Conjunto do Eixo Y	1rd Angle Projection 
		SCALE: 1 : 2.5
		FORMAT: A3
		SHEET 1 OF 1

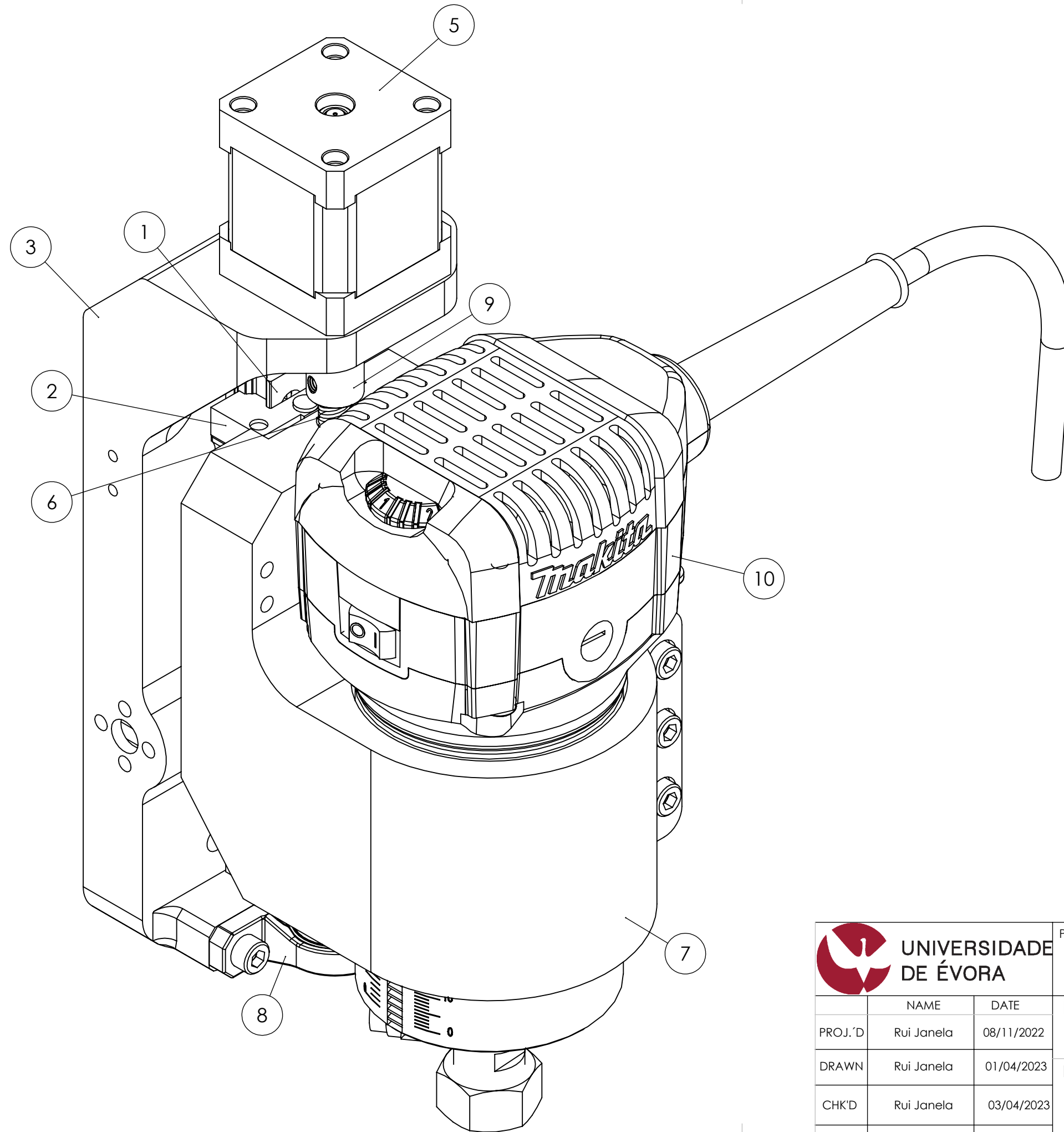
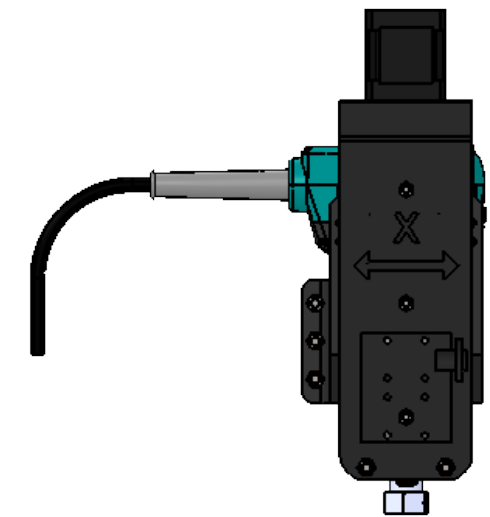



ITEM NO.	DESCRIPTION	QTY.
1	Perfil de Alumínio 30x60 com 350 mm	1
2	Carrinho MGN12H da Guia Linear	2
3	Carril de Guia Linear MGN12 com 300mm	2
4	Suporte Eixo Z	1
5	Motor Nema 17	1
6	Suporte Motor X	1
7	Fuso T8 350 mm	1
8	Porca do Fuso	1
9	Chumaceira do Fuso	1
10	Torre Direita Eixo Y	1
11	Torre Esquerda Eixo Y	1
12	Acoplamento Rígido 5-8	1
13	M3 - 12 mm	36
14	M4 - 16 mm	8
15	M8 - 20 mm	4
16	M4 - 12 mm	4
17	Porca M5	2
18	M5 - 12 mm	2



 UNIVERSIDADE DE ÉVORA	PLANT:	Universidade de Évora	<small>UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS DEBUR AND BREAK SHARP EDGES</small>											
	<table border="1"> <tr> <td>PROJ.'D</td> <td>Rui Janela</td> <td>08/11/2022</td> </tr> <tr> <td>DRAWN</td> <td>Rui Janela</td> <td>02/04/2023</td> </tr> <tr> <td>CHK'D</td> <td>Rui Janela</td> <td>03/04/2023</td> </tr> <tr> <td>APPV'D</td> <td>Rui Janela</td> <td>03/04/2023</td> </tr> </table>	PROJ.'D		Rui Janela	08/11/2022	DRAWN	Rui Janela	02/04/2023	CHK'D	Rui Janela	03/04/2023	APPV'D	Rui Janela	03/04/2023
PROJ.'D	Rui Janela	08/11/2022												
DRAWN	Rui Janela	02/04/2023												
CHK'D	Rui Janela	03/04/2023												
APPV'D	Rui Janela	03/04/2023												
SHEET 1 OF 1														

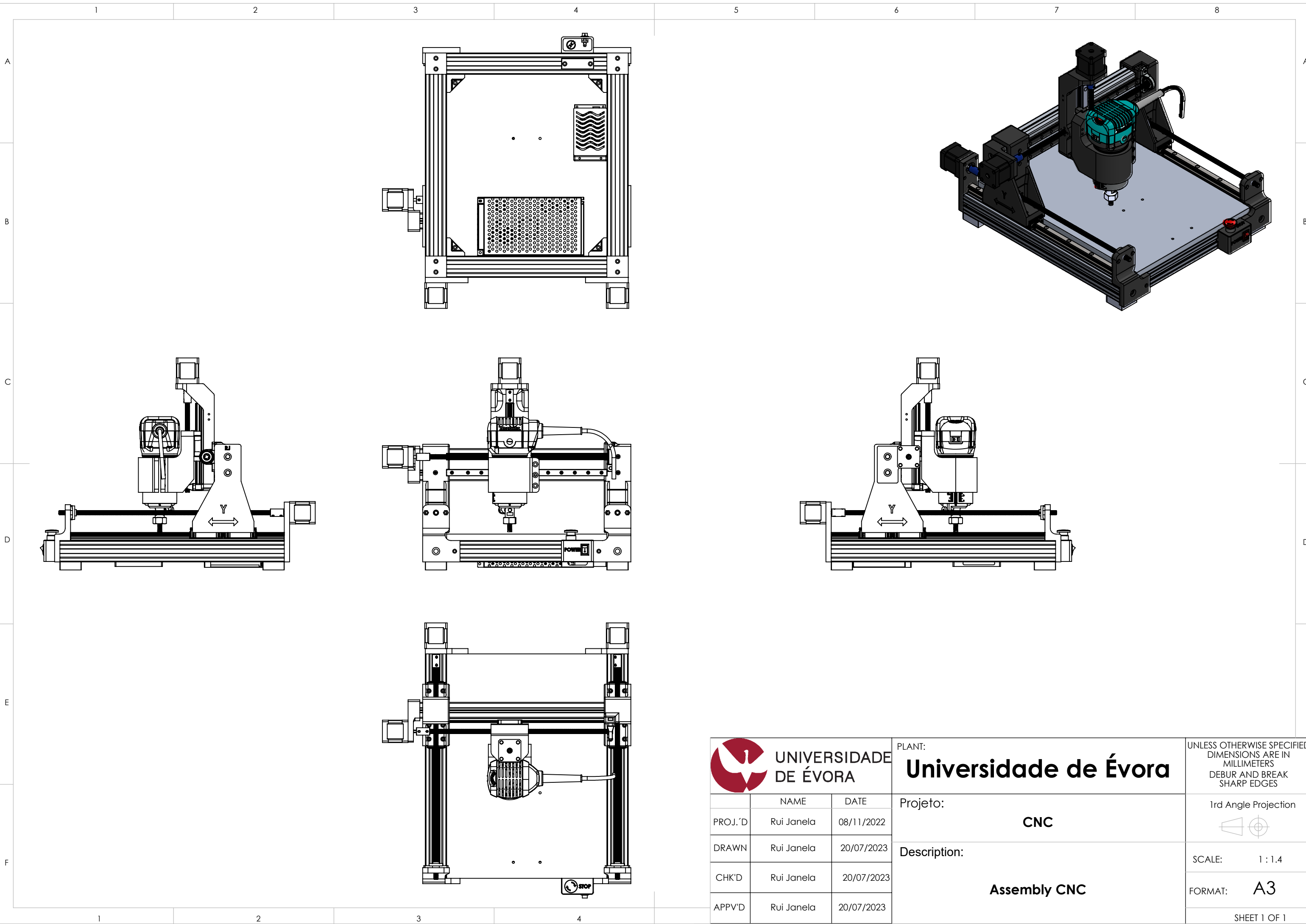
ITEM NO.	DESCRIPTION	QTY.
1	Carril Guia Linear THK HSR15	1
2	Carrinho THK HSR15	1
3	Suporte Eixo Z	1
4	Porca do Fuso	1
5	Motor Nema 17	1
6	Fuso T8 250 mm	1
7	Suporte do Motor/Fresadora	1
8	Chumaceira do Fuso	1
9	Acoplamento Rigido 5-8	1
10	Makita RT0700C	1
11	Porca M5	5
12	Porca M4	3
13	M4 - 25 mm	3
14	M5 - 20 mm	7
15	M5 - 40 mm	2
16	M3 - 12 mm	4
17	M4 - 12 mm	4



 UNIVERSIDADE DE ÉVORA		
PROJ.'D	Rui Janela	08/11/2022
DRAWN	Rui Janela	01/04/2023
CHK'D	Rui Janela	03/04/2023
APPV'D	Rui Janela	03/04/2023

PLANT:	Universidade de Évora
Projeto:	CNC
Description:	Desenho Conjunto do Eixo Z

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	
1rd Angle Projection	
SCALE:	1:1
FORMAT:	A3
SHEET 1 OF 1	




 UNIVERSIDADE DE ÉVORA	NAME	DATE	
	PROJ.'D	Rui Janela	08/11/2022
	DRAWN	Rui Janela	20/07/2023
	CHK'D	Rui Janela	20/07/2023
APPV'D	Rui Janela	20/07/2023	

PLANT:	Universidade de Évora
Projeto:	CNC
Description:	Assembly CNC

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN
MILLIMETERS
DEBUR AND BREAK
SHARP EDGES

1rd Angle Projection



SCALE: 1 : 1.4

FORMAT: **A3**

SHEET 1 OF 1