

Breno Martins Braga — NUSP 12556288
Constanza Maria Reis da Silva Mariano — NUSP 11257884
Douglas Oliveira de Carvalho — NUSP 14637740
Fernanda Quelho Kaiser Saliba Andrade — NUSP 11258162
Gabriel Morth Cursino NUSP — 12553250
Gabriel Silva de Carvalho – NUSP 12730737
Hassan Mohamad Vilela — NUSP 11257904
Jhonatan Ribeiro dos Santos — NUSP 12554477
Mario Lourenço Fernandes — NUSP 11807730
Soitiro Oura — NUSP 12554265
Vinícius de Andrade Cardozo — NUSP 12554290

Projeto de Máquinas: Torno CNC

PMR3411 - Projeto de Máquinas
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
17 de novembro, 2024

Lista de ilustrações

Figura 1 – Curva de torque do motor de passo KTC-HT23-400 (CATÁLOGO MOTORES DE PASSO KALATEC..., s.d.).	3
Figura 2 – Representação gráfica do cálculo de volume de trabalho. Fonte: Autor.	7
Figura 3 – Tabela de velocidade de corte para o torno (m/min).	12
Figura 4 – Avaços recomendados de acordo com o diâmetro da peça.	13
Figura 5 – Modelos de viga esbelta com massa central. Fonte: (BLEVINS, 2001) . .	14
Figura 6 – Esboço manual da primeira solução. Fonte: Autor.	16
Figura 7 – Esboço manual da segunda solução. Fonte: Autor.	17
Figura 8 – Esboço da terceira solução. Fonte: Autor.	18
Figura 9 – Esquema elétrico fornecido pelo professor	21
Figura 10 – Esquema elétrico desenvolvido no KiCad	22
Figura 11 – Motor de passo que controla o movimento no eixo Z antes e depois do acoplamento da carga de latão.	23
Figura 12 – Modelo do cilindro oco, para cálculo do momento de inércia de massa. .	24
Figura 13 – Gráfico do Torque (Nm) x Velocidade Linear (mm/s)	26
Figura 14 – Configuração inicial	30
Figura 15 – Configuração dos pinos da porta paralela	31
Figura 16 – Configuração de um dos eixos	32
Figura 17 – Mapeamento feito no qjoypad	33
Figura 18 – Comandos mapeados indicados no Joystick	34
Figura 19 – Interface onde são inseridas informações	35
Figura 20 – Caminho de desbaste gerado para a peça final	35
Figura 21 – Vscode com um código sendo editado	36
Figura 22 – Erro apresentado quando G07 não está ativo	40
Figura 23 – Repositórios remotos adicionados	41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Correlação entre Massa Móvel, Torque e Velocidade Angular	10
Tabela 2 – Matriz de decisão entre as soluções propostas.	19
Tabela 3 – Freqüências e notas da soluções	20
Tabela 4 – Dados necessários para cálculo do torque	25
Tabela 5 – Valores encontrados de velocidade e aceleração lineares e valores calculados de aceleração angular e torque.	26
Tabela 6 – Resultados das medidas no Eixo Z	28
Tabela 7 – Resultados das medidas no Eixo X	28

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Subgrupos	1
2	ESPECIFICAÇÕES DE MÁQUINA	2
2.1	Materiais	2
2.2	Eixo árvore	2
2.2.1	Potência	2
2.2.2	Rotação	3
2.3	Especificações Elétricas	4
2.3.1	Tensão e Corrente	4
2.3.2	Controlador	4
2.3.3	Resolução	4
2.3.4	Avanço rápido	5
2.3.5	Driver e Motor de Passo	5
2.4	Precisão e Acurácia	5
2.5	Dimensões e Peso da Máquina	5
2.6	Cursos e velocidades dos eixos	7
2.6.1	Cursos dos Eixos	7
2.7	Volume de trabalho	7
2.7.1	Velocidades dos Eixos	8
2.8	Frequência Crítica do Laço Estrutural	11
2.9	Tipo de sincronização entre os eixos	11
2.10	Parâmetros de usinagem	11
2.10.1	Velocidade de corte	11
2.10.2	Avanço de corte	13
3	ESTUDO DAS SOLUÇÕES	14
3.1	Parâmetros avaliados	14
3.1.1	Ergonomia	14
3.1.2	Frequência Natural das Soluções	14
3.1.3	Rigidez (Loop Estrutural)	16
3.2	Solução 1	16
3.2.1	Peso	16
3.3	Solução 2	17
3.3.1	Peso	18
3.4	Solução 3	18

3.4.1	Peso	18
3.5	Matriz de Decisão	19
3.5.1	justificativa das notas atribuídas	19
4	PROJETO	21
4.1	Esquema Elétrico	21
4.2	Levantamento da curva do motor de passo	22
4.2.1	Montagem para realizar o teste	22
4.2.2	Passo a passo para abrir o Stepper Configuration Wizard e fazer os testes . .	23
4.2.3	Processamento para gerar a curva do motor	24
4.3	Medição da Precisão e Acurácia	27
4.3.1	Metodologia	27
4.3.2	Resultados	27
5	PROGRAMAÇÃO	29
5.1	Configuração feita no Stepconf Wizard	29
5.2	Configuração do controle manual	32
5.3	Códigos G	34
5.3.1	Geração de códigos G	34
5.3.2	Tratamento do código G gerado	35
5.4	Procedimento de usinagem	36
5.4.1	Tratamento Inicial da Peça: Desbaste e Faceamento	37
5.4.2	Posicionamento Manual da Ferramenta	37
5.4.2.1	Desbaste	37
5.4.2.2	Faceamento	37
5.4.3	Configuração Inicial do Ambiente de Programação	38
5.4.4	Referenciamento (Homing) e Modos de Coordenadas	38
5.4.4.1	Definição do Zero Peça	38
5.4.5	Carregando e Executando Código G	38
5.5	Desafios encontrados	39
5.5.1	Modo de diâmetro (G07)	39
5.5.2	Instalação do qjoypad	40
5.5.3	Reconhecimento de periféricos	41
6	PRÓXIMOS PASSOS	42
	Referências	43
7	ANEXOS	44

1 Introdução

1.1 Subgrupos

Para obter uma otimização na organização do projeto, e garantir uma divisão justa e igual para todos os membros, o grupo se dividiu em subgrupos, cada um responsável por uma parte importante do projeto. É importante ressaltar que os membros da equipe são responsáveis por ajudar em todas as partes do trabalho, não somente o subgrupo em que está inserido, de forma que seja possível uma boa comunicação entre os times. A divisão dos subgrupos escolhida foi a seguinte:

- **Gerência:** a gerente do grupo é responsável por garantir uma boa organização do trabalho como um todo, além de verificar se todos os membros do grupo estão participando do projeto.
- **Mecânica:** este subgrupo tem como função garantir o bom funcionamento da parte estrutural da máquina: desde o esboço inicial, passando pela escolha de materiais, até a montagem do protótipo.
- **Eletrônica:** esta equipe cuida de todos os componentes elétricos do torno, suas conexões e seu bom funcionamento.
- **Programação:** Este time deve realizar a parte da lógica de funcionamento e do código Linux CNC da máquina.

É notável que todos os subgrupos devem se comunicar entre si para o bom funcionamento do projeto, e é claro, trabalhar em conjunto para que a máquina funcione da maneira desejada.

2 Especificações de máquina

Neste capítulo, são apresentados os materiais escolhidos e as especificações da máquina, como por exemplo o volume de trabalho, a precisão e a velocidade de usinagem, parâmetros essenciais para a compreensão do funcionamento de um torno.

2.1 Materiais

Dentre os materiais disponíveis, esse grupo selecionou os seguintes:

- Inversor CFM 500
- Correia sincronizadora Optibelt ZR 345L
- Polia 26 L 075
- Polia 48 L 075
- Mesa deslizante 3 (430 mm) e 4 (280 mm)
- 2x Motor KTC HT-23-400
- 2x Acoplamento fole (tipo 3)

2.2 Eixo árvore

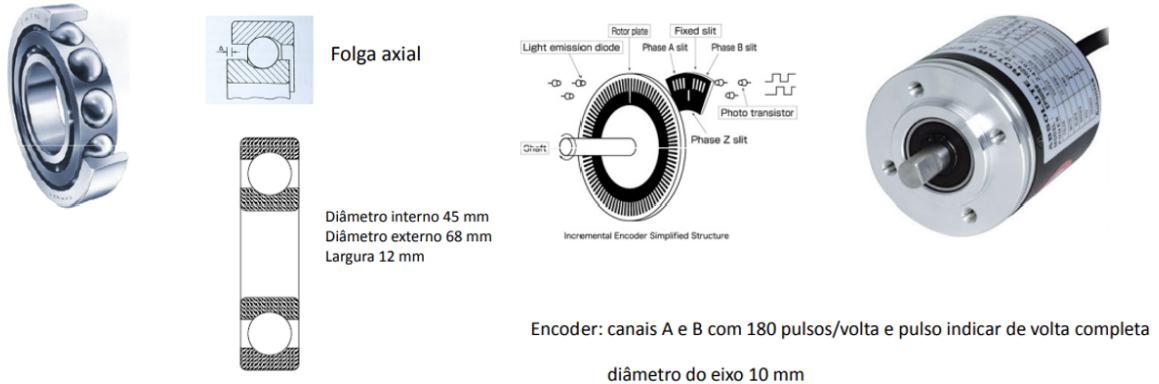
O eixo árvore especificado para a máquina é composto por uma placa de três castanhas para fixação da peça, perfil tubular de aço com seção quadrada de 100 mm de lado e 3,18 mm de parede, rolamentos radiais de esferas, polia para correia sincronizadora e encoder óptico.

Seguem as imagens que especificam o funcionamento do encoder óptico e também o rolamento de esferas:

2.2.1 Potência

De acordo com as especificações iniciais do motor CA que transmitirá movimento à máquina por meio da transmissão por correia, a sua potência fornecida é de 0,5 HP, dada uma tensão de 220V e uma rotação de 1720rpm.

As potências fornecidas pelo motor de passo, no entanto, variam de modelo para modelo. Considerando o motor KTC-HT23-401, temos diferentes valores a depender da operação (torque transmitido e respectiva velocidade angular).



O motor KTC-HT23-400 possui uma curva de torque dada o valor do par revoluções por segundo e torque que transmite a maior potência para o sistema é um torque de 0,67Nm a uma rotação de 15 revoluções por segundo, que gera uma potência de 0,08468 HP.

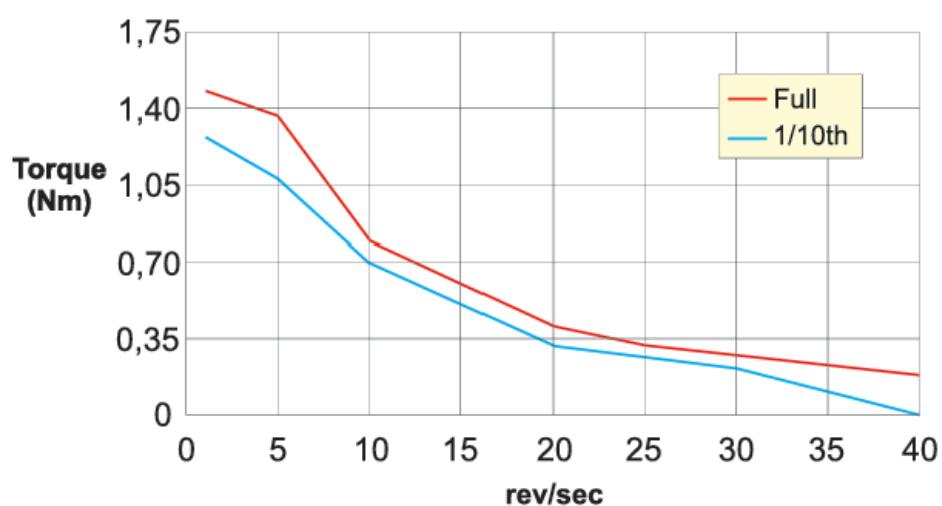


Figura 1 – Curva de torque do motor de passo KTC-HT23-400 (CATÁLOGO MOTORES DE PASSO KALATEC..., s.d.).

2.2.2 Rotação

Levando em consideração a tabela e sabendo que o inversor a ser utilizado armazena até 8 velocidades, podemos escolhê-las de acordo com a ferramenta, que será de aço rápido, e o material usinado, que será de material mole (para as presentes especificações utiliza-se o Nylon). Deve-se levar também em conta que a placa de castanhas possui limitação de rotação de 900 RPM.

Considerando um peça de nylon de diâmetro máximo 100mm a rotação do eixo necessária, de acordo com a equação 21, na seção 13.1, para as operações de usinagem é

	Pot [KW]	Tensão [V]	Corrente [A]		
KTC-HT-23-400	0,063	31,5	2,80	2,00	1,40
Motor CA 0.5 HP	0,373	220	-	1,69	-

955 RPM. Esse valor aumentará de forma inversamente proporcional ao diâmetro a peça.

As demais 8 rotações serão ainda escolhidas para cada processo (acabamento, desbaste e rosqueamento) e diâmetro disponível da peça. Em seguida, elas serão programadas no inversor para a usinagem das peças.

2.3 Especificações Elétricas

Para as especificações elétricas foram analisados dados elétricos dos 2 tipos de motores utilizados: KTC - HT -23 - 400 e Motor CA 0,5 HP.

2.3.1 Tensão e Corrente

A máquina será alimentada com tensão e corrente adequadas para suportar os motores e outros componentes eletrônicos, garantindo a eficiência energética e a segurança operacional.

2.3.2 Controlador

O controlador escolhido para a máquina é o Linux CNC, que permitirá um controle preciso das operações. Será configurado para suportar a interface com os motores de passo e demais componentes eletrônicos.

As principais atividades que o dispositivo desempenhará serão:

- Comunicação por portas paralelas
- Controle automático por código G
- Controle automático dos motores de passo sem feedback
- Controle automático da velocidade do eixo árvore com feedback de um encoder
- Controle manual utilizando um joystick

2.3.3 Resolução

Os motores de passo selecionados realizam 200 passos por volta, ou seja 1.8° por passo; Com o driver de micropasso temos 10x o número de passos por volta, logo 0.18° por passo.

Para ambas as nossas mesas deslizantes temos que seus fusos tem passo igual a 5mm ou uma volta completa, move a mesa 5mm.

$$Resolução = \frac{\text{Passo}}{\text{Resolução do conjunto}} = \frac{5\text{mm/volta}}{2000\text{steps/volta}} = 2.5\mu\text{m/volta} \quad (2.1)$$

Portanto, a resolução máxima de movimentação de ambas as mesas deslizantes é de $2.5\mu\text{m}$. Ou seja, esse valor corresponde ao menor incremento que o controle é capaz de executar.

2.3.4 Avanço rápido

O avanço foi dimensionado para permitir deslocamentos ágeis entre os ciclos de usinagem, sem comprometer a precisão.

2.3.5 Driver e Motor de Passo

Será utilizado um driver de motor de passo do tipo micro passo com 2000 posições por volta, o que resulta em uma resolução angular de 0.18° por passo.

2.4 Precisão e Acurácia

Para o projeto da máquina busca-se uma precisão de usinagem de décimo de milímetro. Ambos fatores dependerão da construção da máquina como um todo.

2.5 Dimensões e Peso da Máquina

Os materiais possuem os pesos listados abaixo, sendo que as diferentes soluções podem utilizar diferentes elementos, variando o seu peso total. Caso todos os componentes sejam usados, o peso total assume 25.25 kg.

- Mesas Deslizantes: 5 Kg (extraído do Catalogo do produto)
- Motores de passo: 2 Kg (extraído do Manual)
- Encoder: 0,4 Kg (extraído do datasheet)
- Motor CA: 10 Kg (Retirado do Catalogo do produto)
- Inversor: 1 Kg (extraído do Manual do usuário)
- Polias: 2,9 Kg (extraído do Manual)

- Rolamento eixo árvore: 0,15 Kg (Catálogo)
- Acoplamento Tipo Fole: 0,1 Kg
- Correias Sincronizadoras: 0,5 Kg (material é feito de borracha)
- Placa de três castanhas: 3,2 Kg (Especificação da peça)

2.6 Cursos e velocidades dos eixos

Os cursos e as velocidades dos eixos da máquina foram projetados para garantir uma usinagem eficiente e precisa. Abaixo estão as especificações para cada eixo:

2.6.1 Cursos dos Eixos

O torno utilizará blocos deslizantes nos eixos Z e X com comprimentos 540mm e 430mm, respectivamente. Os cursos máximos de fim de curso é descrito na seção abaixo.

Nos dois eixos o movimento será realizado por um fuso de esferas recirculantes (com passo de 5mm) acoplado a um motor de passo.

2.7 Volume de trabalho

Corresponde a área máxima que a peça poderia dentro de uma área útil de trabalho.

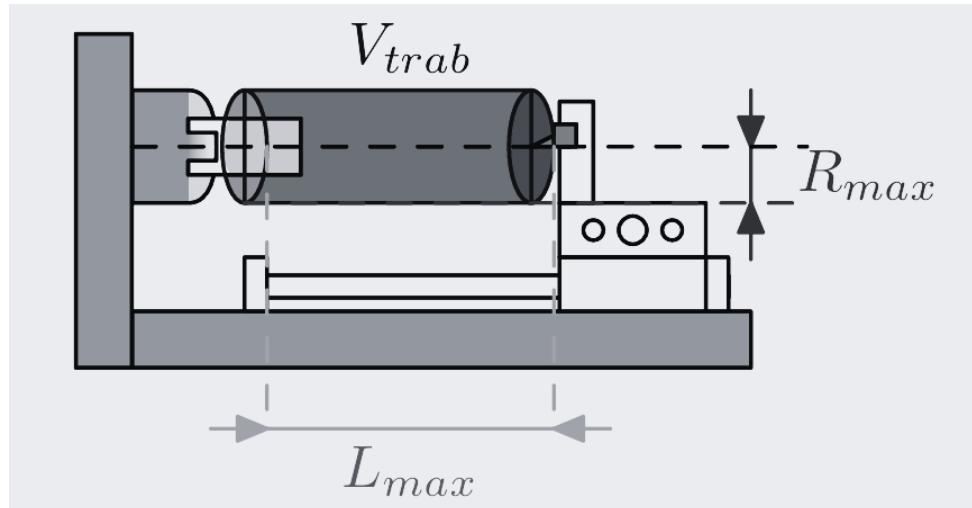


Figura 2 – Representação gráfica do cálculo de volume de trabalho. Fonte: Autor.

$$V_{trab} = (\pi R^2 Max) \cdot L_{Max}$$

$$R_{Max} = 50[mm]$$

L_{Max} = Distância entre furos - Comprimento da mesa - Tamanho de um apoio

$$L_{Max} = 430[mm] - 130[mm] - 20[mm]$$

$$L_{Max} = 280[\text{mm}]$$

$$V_{trab} = (\pi \cdot 502) \cdot 280 = 2.199.114,86[\text{mm}^3]$$

$$V_{trab} = 0,0022[\text{m}^3]$$

2.7.1 Velocidades dos Eixos

O motor de passo KTC-HT23-400 apresenta uma relação inversa entre torque e velocidade, ou seja, à medida que o torque aumenta, a velocidade de rotação diminui. Quando se exige mais torque, a inércia do sistema também precisa ser minimizada para evitar perdas de eficiência e garantir que o motor funcione de maneira adequada.

A seguir, apresenta-se uma tabela que correlaciona os valores de velocidade e torque em função da massa móvel. Essa tabela fornece uma visão clara de como diferentes massas e torques impactam a velocidade e, consequentemente, a aceleração do sistema. A partir desses dados, será possível determinar os coeficientes de aceleração ideais para cada situação, garantindo que o motor funcione de forma eficiente e segura.

Para a obtenção da tabela, usaram as seguintes fórmulas:

$$J_{massa} = (m_{mesa} + m_{peca}) \cdot \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2 \quad (2.2)$$

, para o cálculo do momento de inércia da carga.

$$J_{fuso} = \frac{1}{2} \cdot m_{fuso} \cdot \left(\frac{d_{fuso}}{2}\right)^2 \quad (2.3)$$

, para o cálculo do momento de inércia do fuso.

Baseado na curva de torque da Seção 4.1, percebe-se que a velocidade do motor estará bem próxima da máxima, ou seja, 40[rev/s] e como o passo é 5[mm] temos que a velocidade dos eixos x e z em m/s é 0.2[m/s]. A velocidade média é de 0.1[m/s].

Para estimar o momento de inércia do motor a partir da curva de torque versus velocidade, usou-se a relação entre o torque e a aceleração angular, dada pela equação:

$$T = J \cdot \dot{\omega} \quad (2.4)$$

Onde:

- T é o torque (Nm),

- J é o momento de inércia (em $\text{kg} \cdot \text{m}^2$),
- $\dot{\omega}$ é a aceleração angular (em $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$).

A partir da curva, podemos identificar que o torque máximo T no modo Full Step é aproximadamente 1.4 Nm, e a velocidade máxima do motor é 40 rev/s. Para converter a velocidade em rad/s, usamos a seguinte fórmula:

$$\omega = 2\pi \cdot 40 = 251.2 \text{ rad/s} \quad (2.5)$$

Supondo que o motor acelere de 0 rad/s até 251.2 rad/s em 2 segundos. A aceleração angular é então dada por:

$$\dot{\omega} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{251.2}{2} \text{ rad/s}^2 = 125.6 \text{ rad/s}^2 \quad (2.6)$$

Substituindo os valores de T e $\dot{\omega}$ na equação para o torque:

$$1.4 = J \cdot 125.6 \quad (2.7)$$

Agora, resolvemos para J :

$$J = \frac{1.4}{125.6} = 0.01114 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.8)$$

Assim, o momento de inércia estimado do motor é aproximadamente:

$$J_{motor} \approx 0.011 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (2.9)$$

A inércia acelerada será, portanto,

$$J_{carga} = J_{massa} + J_{fuso} + J_{motor} + J_{acoplamento} \quad (2.10)$$

Por fim, o torque de acionamento será obtido através da expressão:

$$T_{acionamento} = J_{carga} \cdot \dot{\omega} + T_{atrito} \quad (2.11)$$

Para o cálculo do torque de atrito, consideram-se aqueles gerados pelas guias lineares, os mais de rolamento e os fusos.

$$T_{guias} = \frac{p}{2\pi} \cdot \mu_{guias} \cdot [g(m_{mesa} + m_{peca}) + F_{NormalCorte}] \quad (2.12)$$

$$T_{mancal} = \mu \cdot \frac{d_{internoMancal}}{2} \cdot (F_{corte} + F_{préCarga}) \quad (2.13)$$

$$T_{fuso} = \frac{p}{2\pi} \cdot F_{corte} \quad (2.14)$$

$$(2.15)$$

O torque de atrito final, portante, será dado pela expressão:

$$T = T_{guias} + T_{mancal} + T_{fuso} \quad (2.16)$$

Por fim, chegou-se nos resultados da tabela abaixo.

Massa móvel [kg]	Torque [N.m]	Velocidade angular [rad/s]
5	0,65	180
8	0,80	160
10	1,05	130
12	1,25	110

Tabela 1 – Correlação entre Massa Móvel, Torque e Velocidade Angular

A partir da análise da tabela, percebe-se que uma velocidade mais baixa requer um torque mais elevado, pois a resistência mecânica ou a carga aplicada ao motor aumenta. Nesses casos, o motor precisa aplicar mais força (torque) para continuar girando, o que pode comprometer a velocidade máxima atingível. Portanto, ao projetar a dinâmica do sistema, é essencial encontrar um equilíbrio entre torque, inércia e velocidade, ajustando os parâmetros de aceleração para que o motor atinja o torque necessário sem prejudicar a eficiência do sistema.

2.8 Frequência Crítica do Laço Estrutural

A frequência máxima de operação é de 30 Hz, limitada pelos motores utilizados, garantindo que a máquina opere abaixo de sua frequência natural para evitar ressonâncias.

2.9 Tipo de sincronização entre os eixos

Os movimentos dos eixos de uma máquina (como um torno ou fresadora) são coordenados para garantir que eles trabalhem em harmonia durante a operação. A sincronização é essencial para garantir a precisão nos processos de usinagem, já que o movimento de um eixo pode afetar diretamente o movimento do outro, especialmente em operações que requerem alta precisão.

A sincronização entre os eixos será feita por meio de uma **correia sincronizadora**. Ela é responsável por transmitir o movimento de forma simultânea entre os eixos, mantendo uma relação de velocidade constante.

No presente projeto, a correia Optibelt ZR 345L cumpre essa função ao garantir que o movimento de um eixo seja replicado em outro de forma precisa, sem escorregamento, já que as correias sincronizadoras possuem dentes que se encaixam perfeitamente nas polias, evitando desvios.

Dentre as vantagens de utilizar esse tipo de sincronização entre eixos, é que esse é silencioso, requer pouca manutenção e oferece bom desempenho em termos de durabilidade e precisão.

2.10 Parâmetros de usinagem

2.10.1 Velocidade de corte

A velocidade de corte refere-se à distância que a ferramenta percorre ao cortar o material em um determinado período de tempo. Esse parâmetro é crucial na operação de usinagem em um torno, pois permite calcular a rotação, em RPM, da placa de castanha, responsável por gerar a velocidade de corte no material. A velocidade de corte é determinada pela seguinte fórmula:

$$n = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi d} \quad (2.17)$$

Onde:

- n = rotação da máquina, em RPM;
- V_C = velocidade de corte, em m/min;

- d = diâmetro da peça, em mm.

Embora existam fórmulas para calcular a velocidade de corte, ela é frequentemente obtida em tabelas que já relacionam a operação, o material a ser usinado e o tipo de ferramenta de corte utilizada.

Tabela de Velocidade de Corte (Vc) para o torno (em metros por minuto)					
Materiais	Ferramenta de Aço Rápido			Ferramentas de Carboneto Metálico	
	Desbaste	Acabamento	Roscar e Recartilhar	Desbaste	Acabamento
1020 - 1030 Aço Carbono Macio	25	30	10	200	300
1045 - 1050 Aço Carbono Duro	15	20	8	120	160
1060 - 1070 Aço Carbono Extraduro	12	16	6	40	60
Ferro Fundido Maleável	20	25	8	70	85
Ferro Fundido Cinzento	15	20	8	65	95
Ferro Fundido Duro	10	15	6	30	50
Bronze	30	40	10 a 25	300	380
Latão e Bronze	40	50	10 a 25	350	400
Alumínio	60	90	15 a 35	500	700
Fibra e Ebonite	25	40	10 a 20	120	150

Figura 3 – Tabela de velocidade de corte para o torno (m/min).

O Nylon 6.0 não está especificado na tabela acima, portanto, realizou-se uma pesquisa em sites de fabricantes de Nylon 6.0. De acordo com essas fontes, a velocidade de corte recomendada para o material varia entre 50 e 500 m/min, dependendo da operação realizada. Para o desbaste, utilizaremos uma velocidade de corte de 300 m/min. Com base nesse valor, é possível calcular a rotação necessária para usinar três tarugos de diferentes diâmetros: 25 mm, 50 mm e 100 mm.

Abaixo estão os cálculos da rotação necessária para manter a velocidade de corte de 300 m/min em cada um dos casos (NYLON 6..., s.d.):

Para 25mm de diâmetro:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi d} = \frac{300 \cdot 1000}{\pi \cdot 25} = 3822 \text{ rpm} \quad (2.18)$$

Para 50mm de diâmetro:

$$n = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi d} = \frac{300 \cdot 1000}{\pi \cdot 50} = 1911 \text{ rpm} \quad (2.19)$$

Para 100mm de diâmetro:

$$n = \frac{V_C \cdot 1000}{\pi d} = \frac{300 \cdot 1000}{\pi \cdot 100} = 955 \text{ rpm} \quad (2.20)$$

Esses valores são fundamentais, pois a utilização de velocidades de corte inadequadas na usinagem pode gerar diversos problemas. Quando a velocidade de corte está acima da recomendada, pode ocorrer o superaquecimento tanto da peça quanto da ferramenta, além da perda do fio de corte da ferramenta. Por outro lado, uma velocidade de corte abaixo do recomendado pode causar o travamento da ferramenta, muitas vezes resultando em sua quebra.

2.10.2 Avanço de corte

O avanço de corte representa a relação entre a velocidade de deslocamento da ferramenta e a velocidade da peça por rotação do eixo da máquina (mm/rotação). Ele depende diretamente da escolha da velocidade de corte, e, após essa definição, é necessário selecionar o avanço de corte adequado. Assim como a velocidade de corte, o avanço de corte é fornecido por meio de tabelas disponibilizadas pelos fabricantes de ferramentas. Essas tabelas relacionam o material a ser usinado, o material da ferramenta e o tipo de operação a ser realizada. Abaixo está um exemplo de tabela de avanços de corte:

Avanços recomendados de acordo com diâmetro da peça.			
Diâmetro em mm	Avanços para desbaste	Avanços para acabamentos	Avanços para: Sangrar, Torneamento interno.
	Em mm/rotação	Em mm/rotação	Em mm/rotação
10 a 25	0,1	0,05	0,05
26 a 50	0,2	0,1	0,1
51 a 75	0,25	0,15	0,1
76 a 100	0,3	0,2	0,1
101 a 150	0,45	0,3	0,2
151 a 300	0,5	0,3	0,2
301 a 500	0,6	0,4	0,3

Figura 4 – Avanços recomendados de acordo com o diâmetro da peça.

Para o caso do Nylon 6.0, os fabricantes recomendam um avanço de corte de 0,5 mm/rotação para operações de desbaste e 0,05 mm/rotação para operações de acabamento. Essas recomendações visam otimizar a qualidade do corte e a durabilidade da ferramenta, garantindo um bom equilíbrio entre eficiência e precisão durante o processo de usinagem.

3 Estudo das soluções

3.1 Parâmetros avaliados

Durante o desenvolvimento do projeto, serão analisadas diferentes topologias e soluções para maximizar o desempenho da máquina, considerando parâmetros como frequência natural, rigidez, consumo de materiais e velocidade máxima.

3.1.1 Ergonomia

A máquina foi projetada para facilitar o acesso aos seus componentes e o ajuste manual, quando necessário, considerando a segurança e o conforto do operador.

3.1.2 FrequênciA Natural das Soluções

O primeiro passo para verificar se a frequência natural de uma máquina está assumindo um valor coerente com a aplicação é comparando-a com a frequência de operação dela. Dessa forma, utilizando uma frequência de operação de 30 MHz — proveniente dos motores e definida nas especificações de projeto, é preciso garantir que a frequência natural de vibração da solução seja maior que essa.

Dada a complexidade da estrutura detalhada e da definição de uma equação do movimento que poderia ser proveniente da situação real das guias e das mesas, será utilizado um modelo de simplificação, com algumas hipóteses assumidas. O livro (BLEVINS, 2001) foi utilizado como base para definição desse modelo estrutural para este cálculo. Assim, a versão simplificada do elemento crítico vibrante — guia e mesa — foi considerada como uma barra esbelta com uma massa apoiada no centro. Duas alternativas foram consideradas, representadas na Fig. 5.

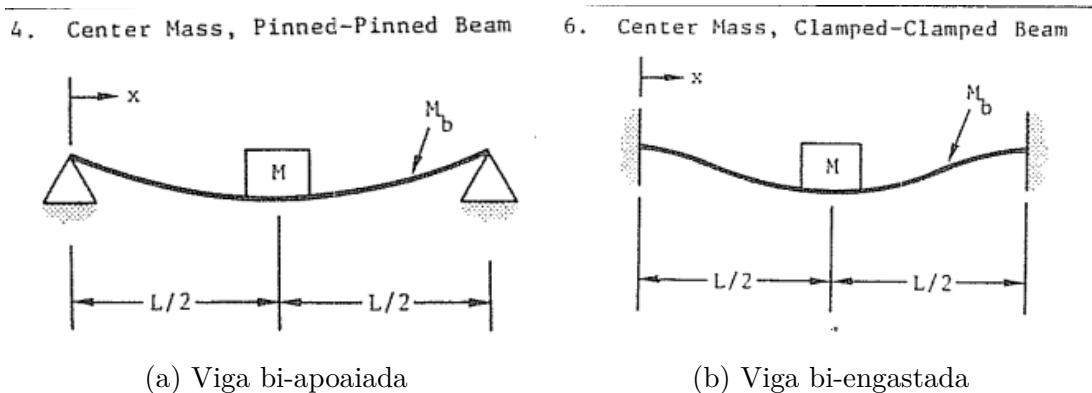


Figura 5 – Modelos de viga esbelta com massa central. Fonte: (BLEVINS, 2001)

Para o modelo representado em 5(a), a frequência natural pode ser sintetizada pela Eq. 3.1, enquanto o modelo em 5(b) pela Eq. 3.2.

$$\frac{2}{\pi} \left[\frac{3EI}{L^3(M + 0.49M_b)} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

$$\frac{4}{\pi} \left[\frac{3EI}{L^3(M + 0.37M_b)} \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Considerando o pior caso, em que a frequência natural de vibração é menor e, portanto, mais próxima da frequência mínima limitada pelas especificações do projeto, foi selecionado o modelo da Eq. 3.1: a viga bi-apoiada.

Uma vez selecionado o modelo, é possível estudar a expressão para que sejam especificados os parâmetros utilizados. Destrinchando-os, é preciso conhecer propriedades mecânicas, estruturais e geométricas dos elementos da composição — guias e a massa móvel:

- E — módulo de elasticidade do perfil
- I — segundo momento de inércia do perfil quando uma carga é aplicada e ha deflexão
- L — comprimento do perfil
- M — massa móvel posicionada no centro do perfil
- M_b — massa dos perfis/guias

Adicionalmente, é possível detalhar o momento de inércia e a massa móvel, definindo-os respectivamente a partir das Eqs. 3.3 e 3.1.2. O momento de inércia é como o momento de inércia a flexão para duas barras cilíndricas, no caso do eixo das guias. Como a seção é formada por duas barras, deve-se multiplicar o valor de I por dois. Vale ressaltar que esse cálculo pode ser aplicado para as soluções convencionais onde a seção mais propensa a vibração por flexão é a das guias lineares. Posteriormente, na análise de cada uma das soluções, são propostos cálculos de momentos de inércia e massas móveis específicas para cada um dos modelos.

$$I = \frac{\pi R^4}{4} \quad (3.3)$$

$M_{móvel} = (\text{Massa da mesa deslizante}) \times 2 + \text{Massa dos perfis da mesa superior} + \text{Massa do porta ferramenta}$

A partir dessas expressões, é necessário fornecer o valor de mais parâmetros, sendo eles:

- R — raio dos perfis
- ρ — massa específica do material que compõe o perfil e a mesa (nessa aplicação, esse material é aço)

Dessa maneira, é possível determinar, baseado no posicionamento e na escolha das mesa deslizantes assim como sua fixação e adição de massas móveis, qual será a frequência crítica de vibração natural.

Em adição, é também possível determinar outro tipo de frequência natural de vibração, sendo ela a vibração torsional, que pode ocorrer entre as guias e a mesa. Mas, como essa seria menos menos crítica em relação à frequência de operação, não será limitante para este projeto.

3.1.3 Rigidez (Loop Estrutural)

A rigidez estrutural foi analisada para minimizar deformações durante a operação, garantindo precisão e acurácia nas usinagens. O material mole impacta a rigidez.

3.2 Solução 1

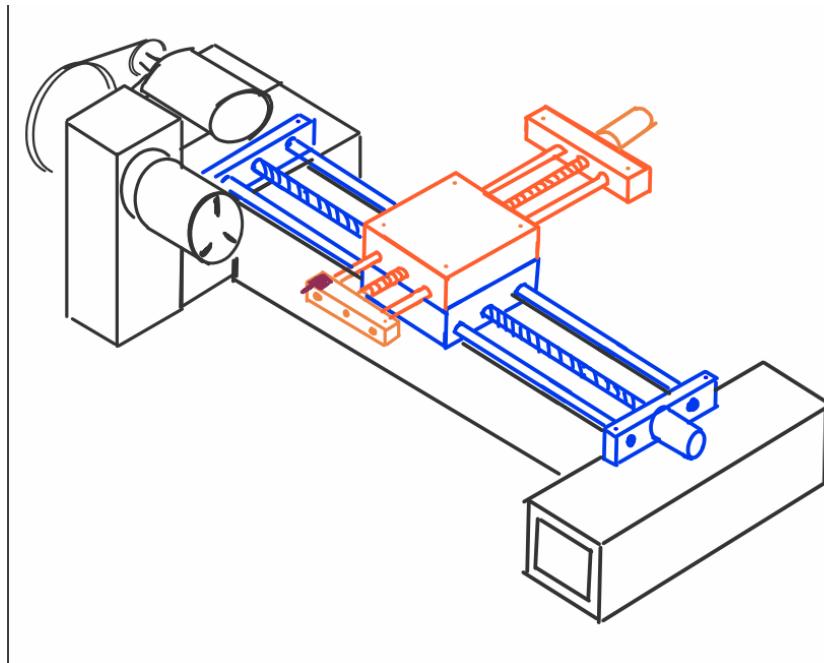


Figura 6 – Esboço manual da primeira solução. Fonte: Autor.

3.2.1 Peso

Considerando 3 perfis de 100mmx100mm e tendo como base a estimativa de dimensão:

- 860mm de comprimento: 8,3kg
- 400mm de largura: 3,9kg
- 270mm de altura: 2,6kg

Com uma chapa de aço 3,2mm entre as mesas considera-se 290mm de comprimento e 150mm de largura, dimensões suficientes para fixação da guia.

Peso: 0,824 kg

Peso extra relacionado a solução 2: 15,7kg

Peso total: 40,9kg

3.3 Solução 2

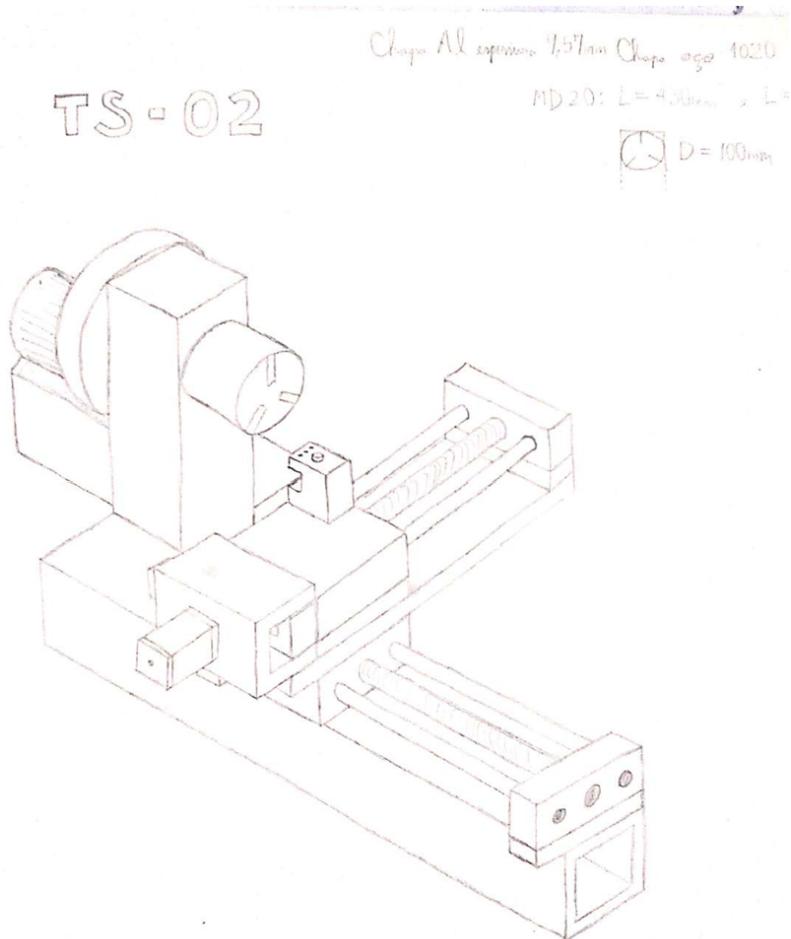


Figura 7 – Esboço manual da segunda solução. Fonte: Autor.

3.3.1 Peso

3.4 Solução 3

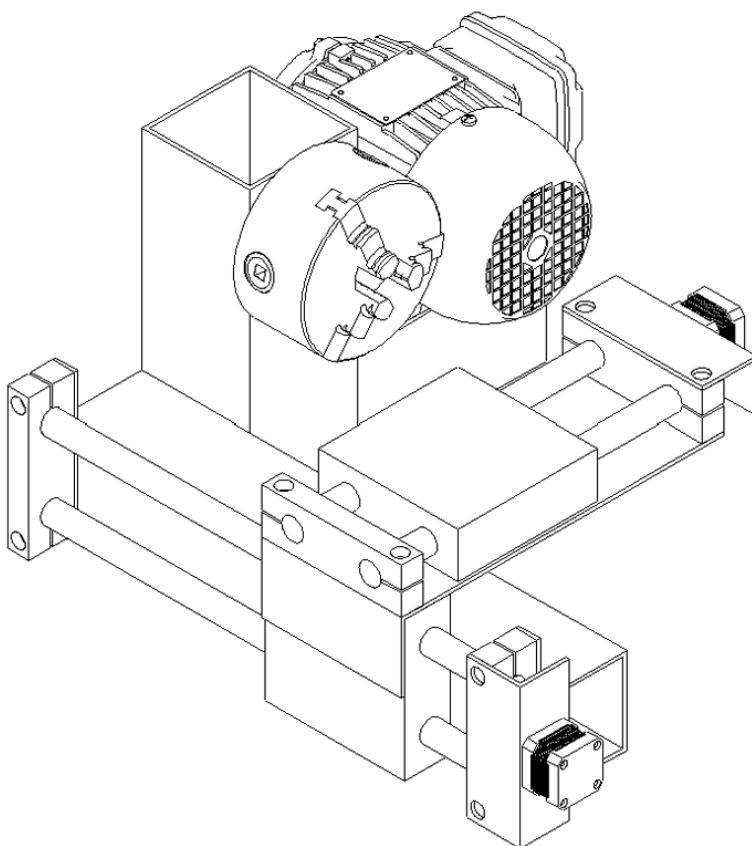


Figura 8 – Esboço da terceira solução. Fonte: Autor.

3.4.1 Peso

- 2x chapas fixação eixo Z: 0.126 kg
- 2x placa motor de passo: 0.586 kg
- Eixo árvore: 2.54 kg
- Eixo Z : 3.473 kg
- Placa mesa de cima : 1.181 kg
- Chapa do motor: 0.372 kg
- Base do motor : 1.702 kg
- Porta ferramentas: 0.37 kg

Peso total: 10.35 kg

3.5 Matriz de Decisão

Critério	Peso	Solução 1		Solução 2		Solução 3	
		Nota	PxN	Nota	PxN	Nota	PxN
Peso	3	3	9	5	15	3	9
Rigidez	7	5	35	5	35	3	21
Frequência natural	5	3	15	5	25	1	5
Velocidade e acelerações	6	3	18	5	30	3	18
Erro de Abbe	3	3	9	5	15	1	3
Facilidade de montagem	2	3	6	5	10	1	2
Facilidade de manufatura	1	3	3	5	5	3	3
Segurança do operador	4	1	4	5	20	5	20
Média Ponderada		3,35		4,74		2,35	

Tabela 2 – Matriz de decisão entre as soluções propostas.

3.5.1 justificativa das notas atribuídas

Para todos os critérios, as notas variam de 1 a 5 e procura-se atribuir apenas notas ímpares para as soluções de maneira que haja distanciamento significativo entre as notas medias ponderadas, possibilitando a escolha da solução.

- Peso

Tanto a solução 1 quanto a 3 possuem uma chapa que une a mesa superior à mesa inferior. Por isso, receberam notas menores do que a solução 2. Além disso, o peso adicionado por essa chapa é igual em ambos os casos e não é tão significativo quando comparado ao peso total da máquina para justificar a atribuição de uma nota "1" para as soluções.

- Rigidez

A solução 1 e 2 receberam nota máxima nesse quesito, pois é possível identificar que o material a ser uninado seria o ponto mais fraco do laço estrutural. Já para a solução 3 foi atribuída uma nota menor, pois como a ferramenta estaria fixada na ponta da mesa em balanço, a mesa poderia sofrer deformações que afetassem a rigidez da solução.

- Frequência natural

Dados os modelos de uma viga bi-apoiada para as soluções 1 e 2, e de uma viga com uma das extremidades engastada e a outra em balanço para a solução 3, foram calculadas as frequências naturais de oscilações da estrutura composta pelas guias

Solução	Frequência [Hz]	Modo	Nota
1	98	Flexão	3
2	102	Flexão	5
3	53	Flexão	1

Tabela 3 – Freqüências e notas da soluções

e mesa deslizantes superiores ads soluções. Assim, as notas foram atribuidas de maneira diretamente proporcional à freqüência obtida.

- Velocidade e acelerações Como as soluções 1 e 3 possuem maior massa móvel que a 1, foram obtidas para elas acelerações e velocidades máximas menores que para solução 2. assim, elas receberam notas menores

- Erro de Abbe

O Erro de Abbe foi considerado ao analisar a altura da ferramenta em relação ao seu ponto de fixação na quia ou mesa. Essa metodologia foi escolhida pois quanto maior é o porta ferramentas, maior é a deformação gerada nele por conta das forças de usinagem e maior o erro de Abbe.

- Facilidade de montagem

Esse critério foi analisado contando o número de peças necessárias para formar a solução. Além disso, a solução 3 recebeu uma nota menor que a 1, apesar de ter o mesmo numero de peças, por ter uma das extremidades em balanço, o que causaria uma dificuldade para alinhamento das estruturas.

- Facilidade de manufatura

Esse critério foi analisado contando o número de peças necessárias para formar a solução. A solução com menor número de peças recebeu a maior nota.

- Segurança do operador

As soluções 1 e 2 receberam as mesmas notas, mas a solução 3 recebeu uma nota menor por conta da possibilidade de acidentes que podem ser causados pelas vibrações e deformações excessivas em sua extremidade livre.

4 Projeto

(dar um nome melhor pra seção de solução escolhida)

4.1 Esquema Elétrico

Na área de atuadores, foi realizada uma análise do esquema elétrico fornecido pelo professor. A partir disso, verificaram-se as conexões da porta paralela, assim como os componentes e conexões utilizados. Abaixo estão as imagens do esquema original (Fig. 9) e do desenvolvido no KiCad (Fig. 10).

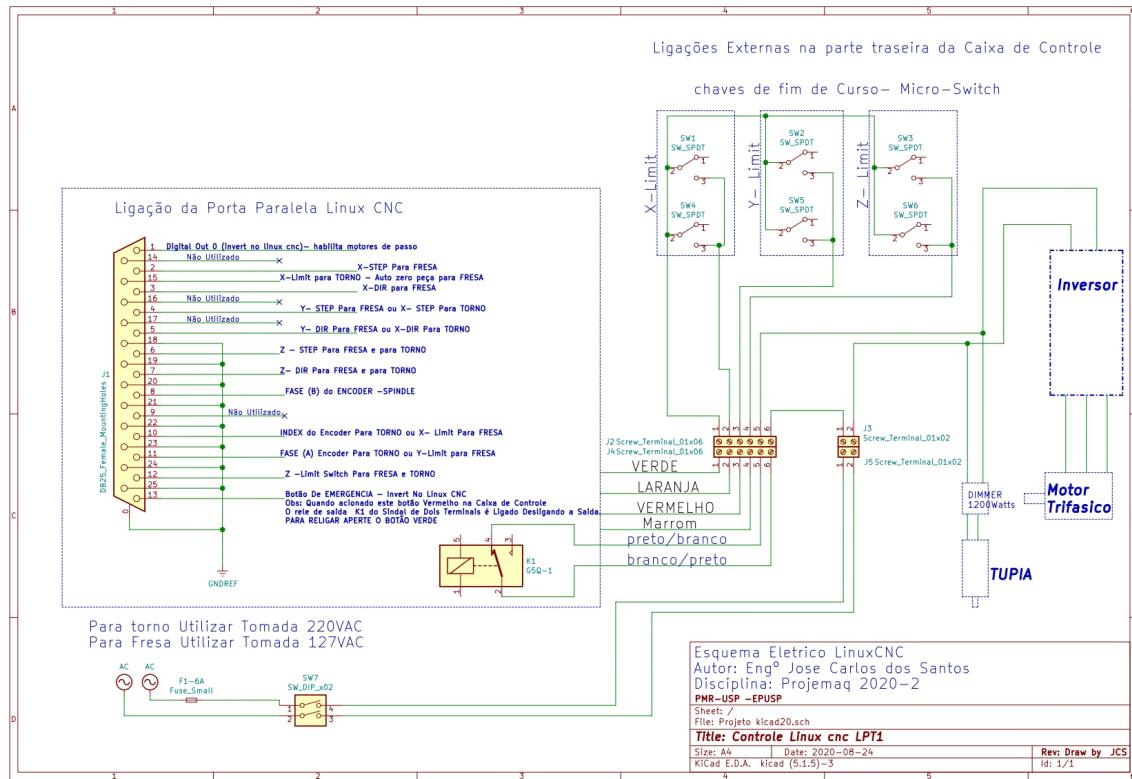


Figura 9 – Esquema elétrico fornecido pelo professor

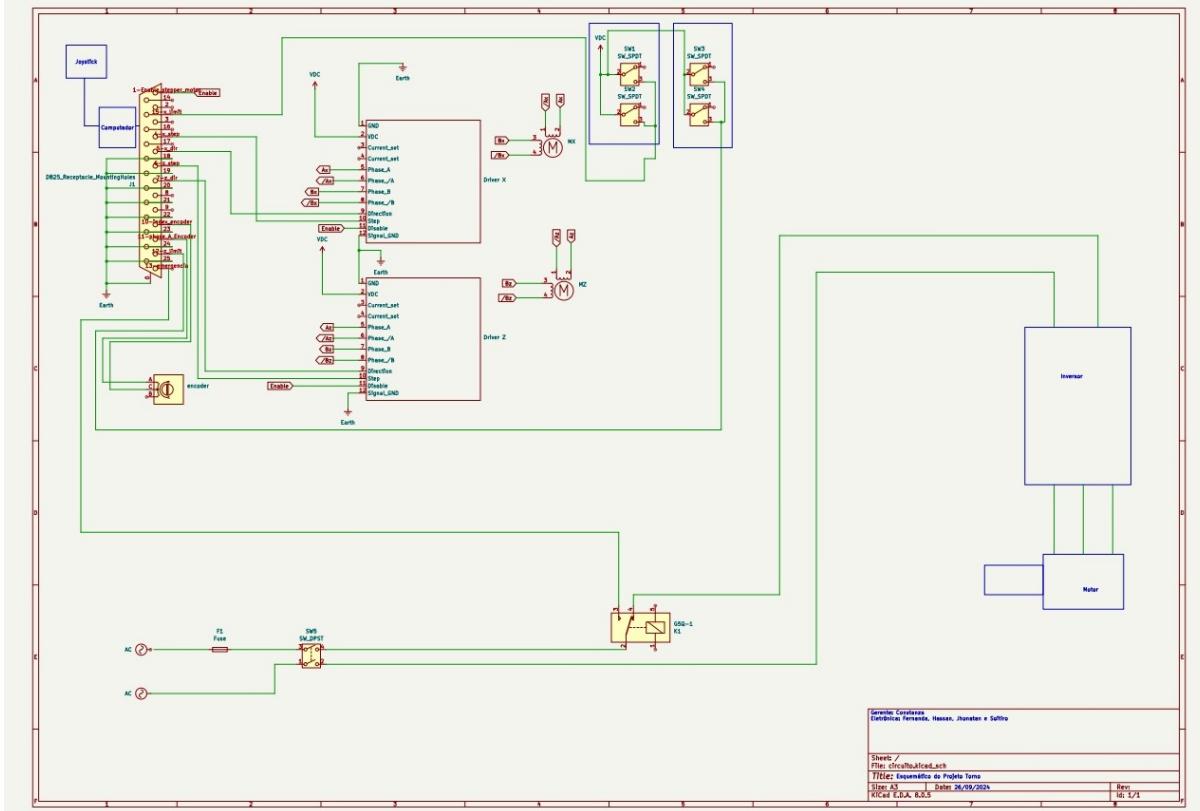


Figura 10 – Esquema elétrico desenvolvido no KiCad

Algumas observações importantes incluem o fato de que o driver utilizado não estava disponível na biblioteca do KiCad, o que tornou necessário criá-lo seguindo as especificações técnicas de seu datasheet. No caso do encoder, foram consideradas apenas duas fases: a fase A e o index.

Para evitar "poluição visual", adotaram-se etiquetas para referenciar as conexões. Para o inversor e o motor, foi feito um esboço simplificado dos componentes, já que as suas características específicas não estavam presentes na biblioteca.

4.2 Levantamento da curva do motor de passo

4.2.1 Montagem para realizar o teste

Para coletar os dados necessários para levantar a curva do motor de passo (Torque x Velocidade Linear):

- O motor foi fixado na mesa com um sargento (o nosso grupo usou o motor responsável pela movimentação no eixo Z);
- A carga de latão foi encaixada no eixo do motor, de forma que um dos furos onde o parafuso será colocado coincida com o lado chanfrado do eixo do motor;

- Primeiro, com o auxílio de uma chave de fenda, colocou-se o parafuso no furo que coincide com o lado chanfrado do eixo do motor;
- Depois, fixou-se o segundo parafuso.

A Fig. 11 mostra a montagem realizada para o teste.

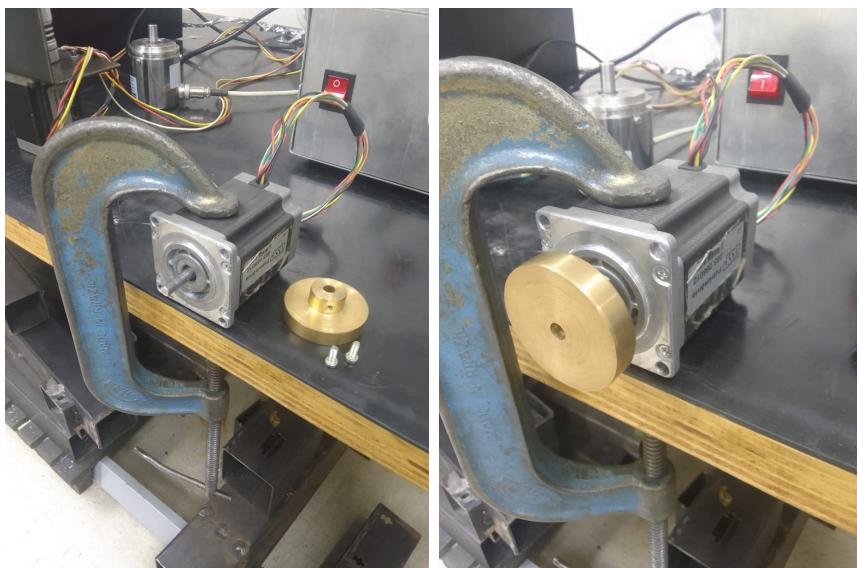


Figura 11 – Motor de passo que controla o movimento no eixo Z antes e depois do acoplamento da carga de latão.

4.2.2 Passo a passo para abrir o Stepper Configuration Wizard e fazer os testes

Concluída a montagem física para o levantamento da curva do motor, abriu-se o Stepconf -Stepper Configuration Wizard no LinuxCNC. A coleta de dados necessários para levantar os pontos da curva do motor é feita por esse aplicativo. As Figs ??—?? mostram a sequência de telas que aparecem até podermos realizar os testes.

Ao chegar na tela da Fig. ??, temos um campo reservado para alterar a velocidade linear (mm/s) e outro para alterar a aceleração linear (mm/s²) da mesa deslizante.

Para cada velocidade escolhida, devemos anotar a máxima aceleração em que o motor ainda funciona sem perder o passo. A perda de passo é caracterizada pela parada da rotação, vibração e ruído do motor.

Nosso grupo decidiu começar a coleta de dados na velocidade de 20 mm/s. Depois, foi-se acrescentando uma unidade ao valor da velocidade. A coleta terminou quando a velocidade atingiu 37.5 mm/s, o máximo valor suportado pelo LinuxCNC devido à limitação imposta pelas suas portas paralelas.

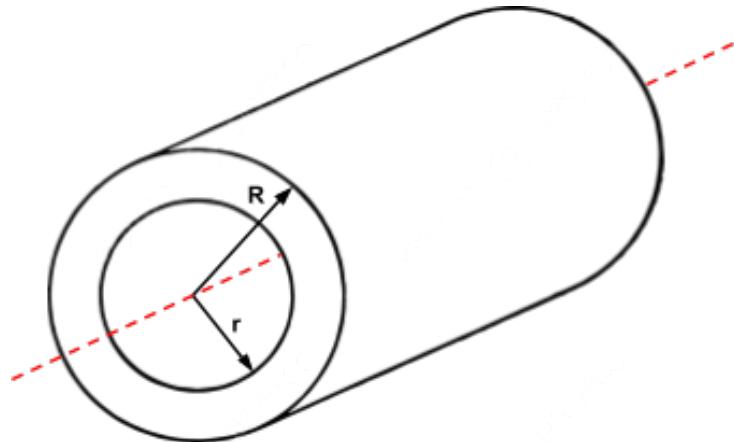


Figura 12 – Modelo do cilindro oco, para cálculo do momento de inércia de massa.

4.2.3 Processamento para gerar a curva do motor

Na mesa deslizante, o passo (5 mm) é a distância que a mesa percorre quando o fuso faz uma rotação completa. Assim, a divisão da aceleração linear (mm/s^2) pelo passo representa a percentagem de rotação do fuso em relação à sua rotação completa durante o intervalo de $1 s^2$. Se multiplicarmos a razão por 2π rad, que é o valor de uma volta completa em radianos, encontramos a aceleração angular (rad/s^2):

$$\alpha = 2\pi \frac{a_{\text{linear}}}{\text{passo}} \quad (4.1)$$

O torque (Nm) é resultado da multiplicação do momento de inércia de massa (Kgm^2) da carga que foi acoplada no eixo do motor pela aceleração angular encontrada pela Eq. 4.1:

$$T = J\alpha \quad (4.2)$$

Para encontrar o momento de inércia de massa, vamos usar o modelo de cilindro oco (Fig. 12), cuja expressão está na Eq. 4.3.

$$J = \frac{M}{2} (R^2 + r^2) \quad (4.3)$$

A carga de latão é modelada como dois cilindros ocos concêntricos, desprezando-se os dois furos para os parafusos e os próprios parafusos. O r é o raio do furo central da carga e é igual para os dois cilindros ocos, diferentemente dos raios externos R_1 e R_2 . As massas M_1 e M_2 de cada cilindro oco são calculadas conhecendo-se a densidade do latão e o volume calculado dos respectivos cilindros.

Dados do cilindro 1 (menor):

- $r = 3.17$ mm

- $R_1 = 10.05$ mm
- $h_1 = 10.24$ mm (altura do cilindro)

Dados do cilindro 2 (maior):

- $r = 3.17$ mm
- $R_2 = 23.83$ mm
- $h_2 = 10$ mm

A densidade do latão foi considerado como $\rho = 8500\text{Kg/m}^3$.

Dessa forma, utilizando as expressões das Eqs. 4.4, 4.5 e ??, foi possível obter os dados necessários, apresentados na Tab. 4.

$$M = \rho V \quad (4.4)$$

$$V = \pi(R^1 - r^2)h \quad (4.5)$$

Tabela 4 – Dados necessários para cálculo do torque

Propriedade	Cilindo 1	Cilindo 2
Volume	$2.9259710^{-6}\text{ m}^3$	$1.7524410^{-5}\text{ m}^3$
Massa	2.487110^{-2} kg	1.489610^{-2} kg
Momento de Inércia	$1.38110^{-6}\text{ kgm}^2$	$4.30410^{-5}\text{ kgm}^2$

A Tab. 5 mostra a velocidade linear e a máxima aceleração linear antes do motor perder o passo. Esses são dados anotados, enquanto α (aceleração angular) e torque são valores calculados.

Velocidade (mm/s)	Aceleração (mm/s ²)	Alfa (rad/s ²)	Torque (Nm)
20	6870	8633,10	0,383817
21	2390	3003,36	0,133526
22	2025	2544,69	0,113432
23	1735	2180,27	0,096932
24	1700	2136,28	0,094977
25	1655	2079,73	0,092462
26	1710	2148,85	0,095535
27	1715	2155,13	0,095871
28	1750	2199,11	0,097770
29	1715	2155,13	0,095815
30	1120	1407,43	0,062573
31	1800	2261,95	0,100065
32	1855	2331,06	0,103636
33	1875	2356,19	0,104754
34	40	50,27	0,002235
35	1070	1344,60	0,059779
36	1870	2349,91	0,104477
37	895	1124,69	0,050032
37,5	1245	1564,51	0,069556

Tabela 5 – Valores encontrados de velocidade e aceleração lineares e valores calculados de aceleração angular e torque.

Possuindo os dados de torque correspondentes a cada velocidade, foi possível plotar a “curva” do motor (Fig. 13).

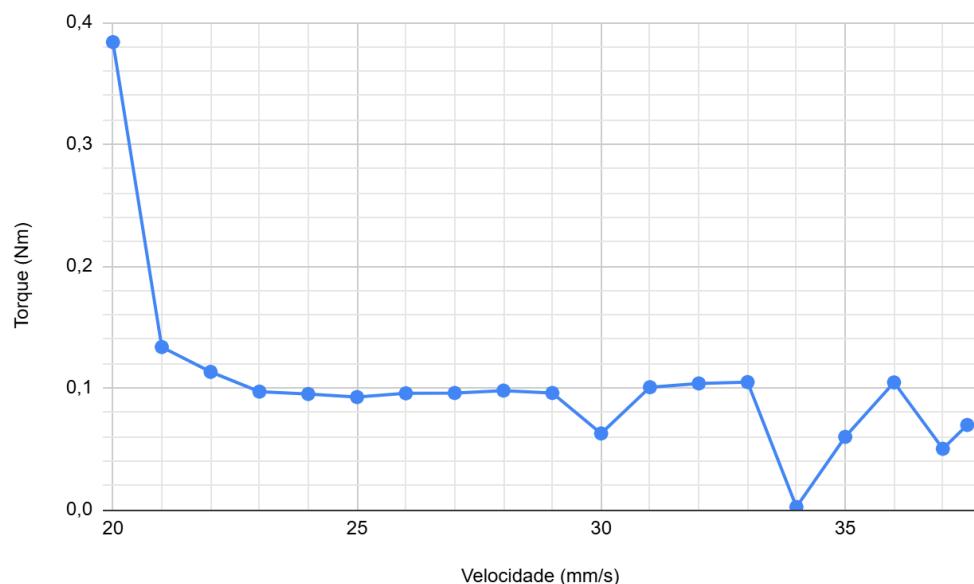


Figura 13 – Gráfico do Torque (Nm) x Velocidade Linear (mm/s)

Adicionalmente, a planilha utilizada para registrar tais valores, assim como cálculos

los e plotagem do gráfico pode ser encontrada no link a seguir: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1jPysggAJq_oss58Nr7ke5LIBtbU1b9r-ls-9ijTzHxM/edit?gid=0#gid=0.

4.3 Medição da Precisão e Acurácia

4.3.1 Metodologia

Primeiramente a posição de origem da mesa é cuidadosamente definida no ponto em que o carro toca a ponta do relógio comparador posicionado, este relógio tem sua posição fixada à extremidade do fuso a ser testado por meio de uma base magnética. Nesse ponto de contato inicial é definido o zero máquina utilizando-se da função de homing do LinuxCNC.

Utilizando o terminal MDI (Manual Data Input) é comandado que o carro se afaste da origem definida a uma distância pré-determinada e em seguida retorne a mesma distância utilizando códigos G, assim eliminando o fator de erro humano nos deslocamentos. Assim, o relógio mede a diferença entre o deslocamento teórico (deslocamento ordenado pelo comando) e seu deslocamento real.

Esse procedimento foi realizado utilizando uma velocidade de deslocamento constante de 200mm/s para dois deslocamentos teóricos por eixo, 100mm e 60mm para o eixo Z, 60mm e 30mm para o eixo X, com 5 medições coletadas do relógio comparador para cada. A seguir, como exemplo do que foi feito, dois comandos utilizados para o primeiro teste do eixo Z:

G53 X0. Z100. F200.

G53 X0. Z0. F200.

Uma vez que a acurácia é a proximidade entre o valor obtido experimentalmente e o valor verdadeiro na medição de uma grandeza física, ela foi calculada pela subtração da média das medições pelo valor real. Já a precisão, que significa grau de variação que surge a partir de diferentes medições, foi medida pelo desvio padrão entre as medições

4.3.2 Resultados

Assim, após as medições, os resultados obtidos foram:

Tabela 6 – Resultados das medidas no Eixo Z

Distância [mm] 100		Distância [mm] 60	
Número	Medidas [mm]	Número	Medidas [mm]
1	100.041	1	60.031
2	100.042	2	60.030
3	100.040	3	60.030
4	100.040	4	60.031
5	100.039	5	60.030
Precisão	0.001140175	Precisão	0.000547723
Acurácia	0.0404	Acurácia	0.0304

Tabela 7 – Resultados das medidas no Eixo X

Distância [mm] 60		Distância [mm] 30	
Número	Medidas [mm]	Número	Medidas [mm]
1	60.039	1	30.030
2	60.038	2	30.031
3	60.038	3	30.030
4	60.038	4	30.030
5	60.038	5	30.030
Precisão	0.000447214	Precisão	0.000447214
Acurácia	0.0382	Acurácia	0.0302

5 Programação

A função da subárea de programação nesse projeto foi desenvolver o CAM e posteriormente o código G de peças que o grupo desejasse usinar, além de preparar o ambiente do LinuxCNC para a execução desse código por meio de configurações e instalações de programas, aspectos que serão discutidos adiante. Além disso, à essa subárea coube o papel de aprender a controlar a máquina manualmente e repassar esse conhecimento aos demais membros do grupo.

Assim, a programação adequada envolve não apenas o prefeito do ambiente (configuração de eixos, homing e seleção de planos de corte) e a criação de código G, mas também a implementação de ferramentas auxiliares, como o uso do qjoypad para mapear comandos do teclado em um Joystick, tornando a operação manual mais intuitiva e, tão importante quanto, a transmissão de conhecimento de operação para todo o grupo.

5.1 Configuração feita no Stepconf Wizard

O aplicativo chamado Stepconf Wizard é a ferramenta mais prática disponível no LinuxCNC para a geração dos arquivos de configuração necessários para a operação da máquina que foi montada. A partir da seleção de parâmetros desejados em sua interface gráfica ele gera automaticamente arquivos de configuração *.hal* que são a camada de abstração entre o hardware da máquina e o software de controle.

Inicialmente foram escolhidos o nome do projeto, a configuração de eixos (isso definiu a máquina como um torno) e a unidade de comprimento padrão. Além disso, foi escolhido o driver Gecko 201, um driver que foi informado ao grupo por um dos técnicos como sendo o adequado para os motores de passo utilizados.

Para encontrar o máximo atraso entre comandos enviados pela porta paralela (jitter) foi preciso apenas executar um teste de latência enquanto a máquina é submetida a estresse computacional. Para fazer isso basta executar o comando **latencytest** em um terminal, o que abre um aplicativo que monitora os tempos de resposta e informa o máximo atraso medido. A seguir é mostrada uma imagem dessa configuração inicial:

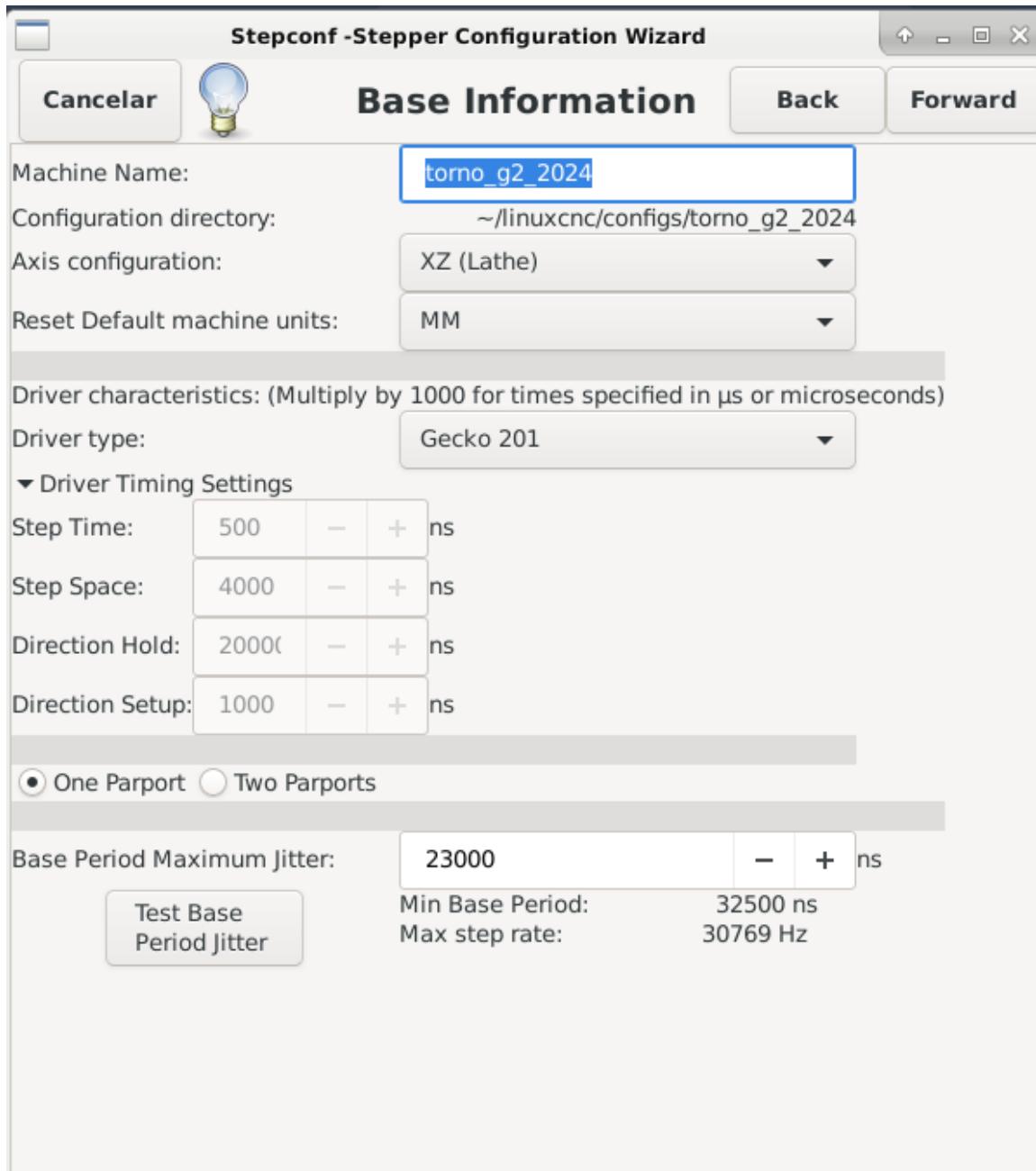


Figura 14 – Configuração inicial

Para que o LinuxCNC seja capaz de enviar sinais corretos para a caixa de controle a pinagem da porta paralela é definida em seguida. Essa pinagem foi disponibilizada para os alunos no moodle no inicio do curso e já foi apresentada anteriormente nesse relatório, porém, devido a peculiaridade da máquina girar seu eixo árvore no sentido anti-horário, a ferramenta foi colada do lado oposto ao usual, o que obrigou o grupo a inverter o sinal do pino que controla a direção do eixo X, de modo que avanços positivos comandados por código G realmente representassem uma aproximação da ferramenta em relação ao material usinado.

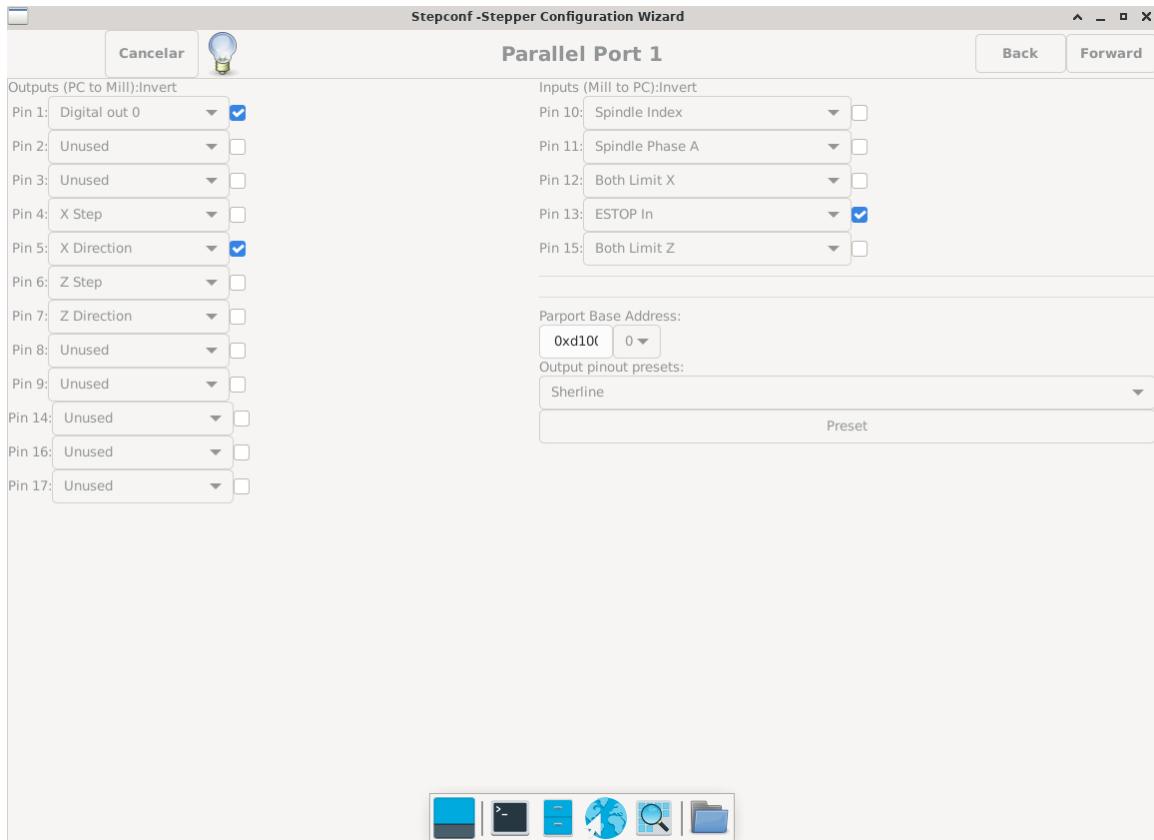


Figura 15 – Configuração dos pinos da porta paralela

Os parâmetros de usinagem de cada eixo são definidos em seguida, sendo os mais relevantes as velocidades e acelerações máximas (25 mm/s e 750 mm/s, respectivamente) que foram definidos levando em consideração segurança de operação e integridade do equipamento (velocidades e acelerações muito grandes aumentam os riscos e as consequências de erros) e recomendações de técnicos que asseguraram ao grupo que essas configurações (que são o padrão) seriam mais que suficientes para as tarefas à serem executadas. Cabe ainda destacar que ambos os eixos receberam a mesma configuração, e que os seus limites estão definidos como valores muito grandes, uma vez que os verdadeiros limites foram definidos pelas chaves de fim de curso, não havendo assim necessidade de utilizar essa configuração para impor limites de deslocamento.

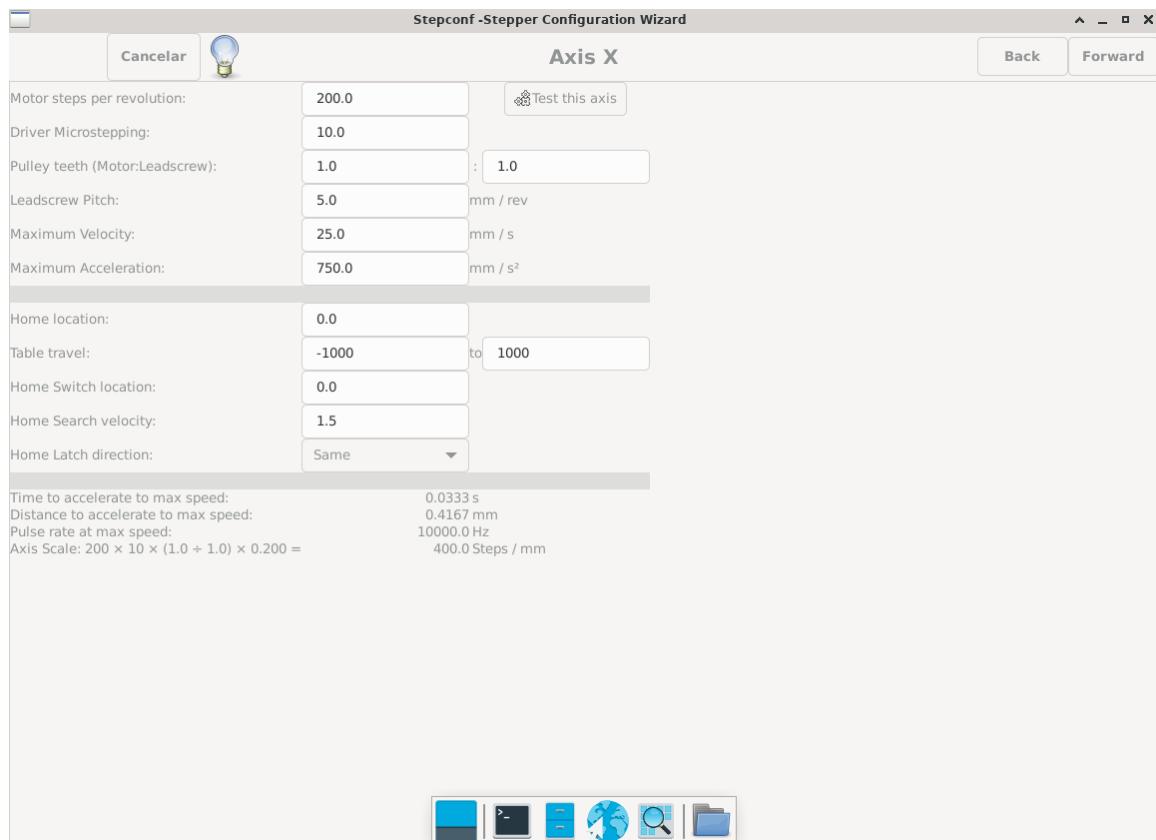


Figura 16 – Configuração de um dos eixos

5.2 Configuração do controle manual

Como requerimento de projeto foi pedido que o grupo mapeasse comandos do teclado que controlam os aspectos de controle manual da máquina no LinuxCNC para um Joystick, por meio de algum programa, de modo a facilitar o controle manual da máquina. Para realizar esse mapeamento, o grupo utilizou um fork do programa qjoyypad, disponível na snapstore (problemas com a instalação serão tratados mais adiante na seção de desafios encontrados). Foram mapeados para o Joystick os seguintes comandos:

- Direita (d-pad direito, analógico)
- Esquerda (d-pad esquerdo, analógico)
- Cima (d-pad acima, analógico)
- Baixo (d-pad abaixo, analógico)
- Aumentar velocidade (R1)
- Diminuir velocidade (L1)
- Selecionar eixo X (L2)

- Selecionar eixo Z (R2)
- Homing do eixo selecionado (L3, R3, botão 3)

Abaixo, imagens das configurações feitas:

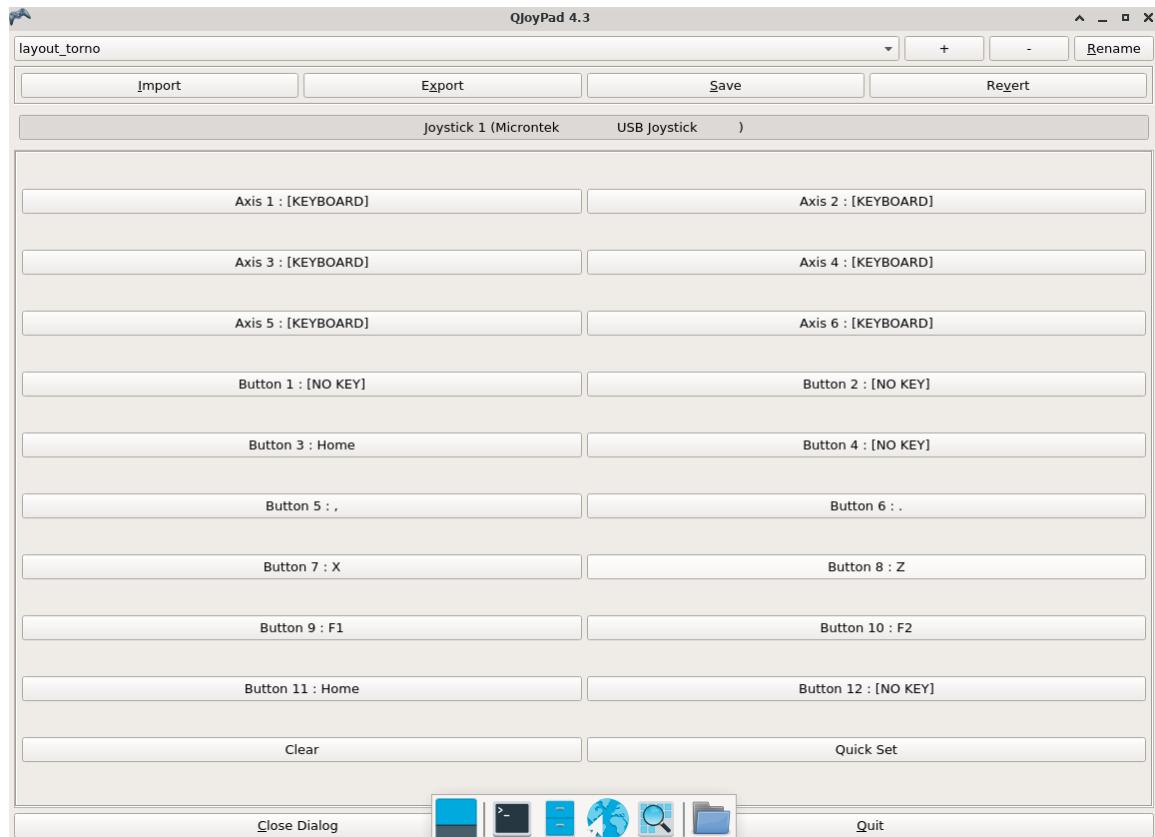


Figura 17 – Mapeamento feito no qjoypad



Figura 18 – Comandos mapeados indicados no Joystick

Cabe ressaltar que, para inicializar o qjoypad, e por consequência habilitar o controle manual no Joystick, é preciso executar o comando qjoypad no terminal.

5.3 Códigos G

5.3.1 Geração de códigos G

A geração de códigos G se deu através da utilização do software Inventor CAM. A partir de um modelo também feito no Inventor, foram selecionados diversos parâmetros de usinagem de modo que uma simulação fidedigna de usinagem pudesse ser gerada. Os parâmetros mais relevantes estão listados a seguir:

- Tipo de ferramenta
- Velocidade de corte
- Velocidade de rotação
- Profundidade de corte máxima

- Fronteiras de corte
- Estratégia de corte

Como exemplo do que está descrito acima, seguem imagens da produção do CAM da peça final:

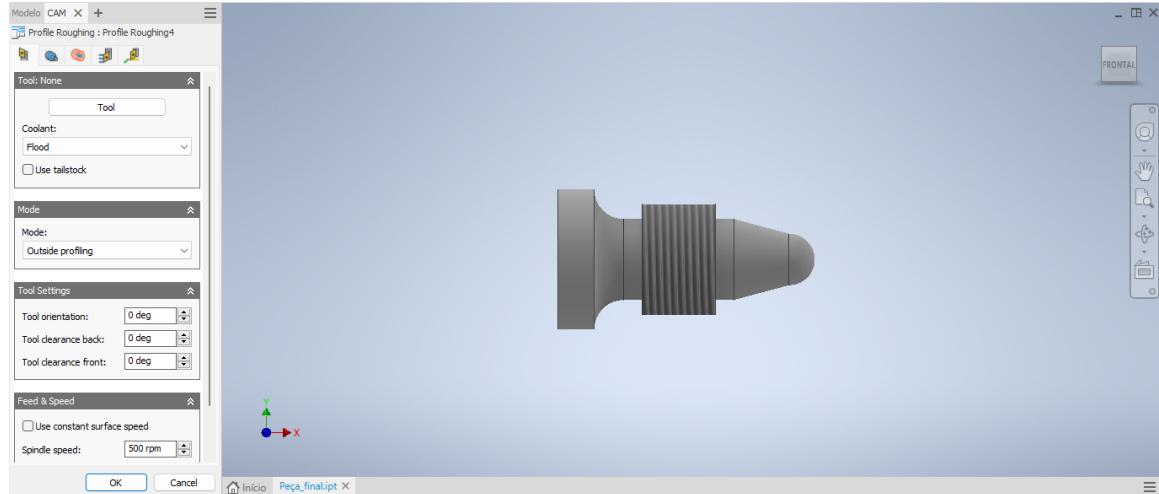


Figura 19 – Interface onde são inseridas informações

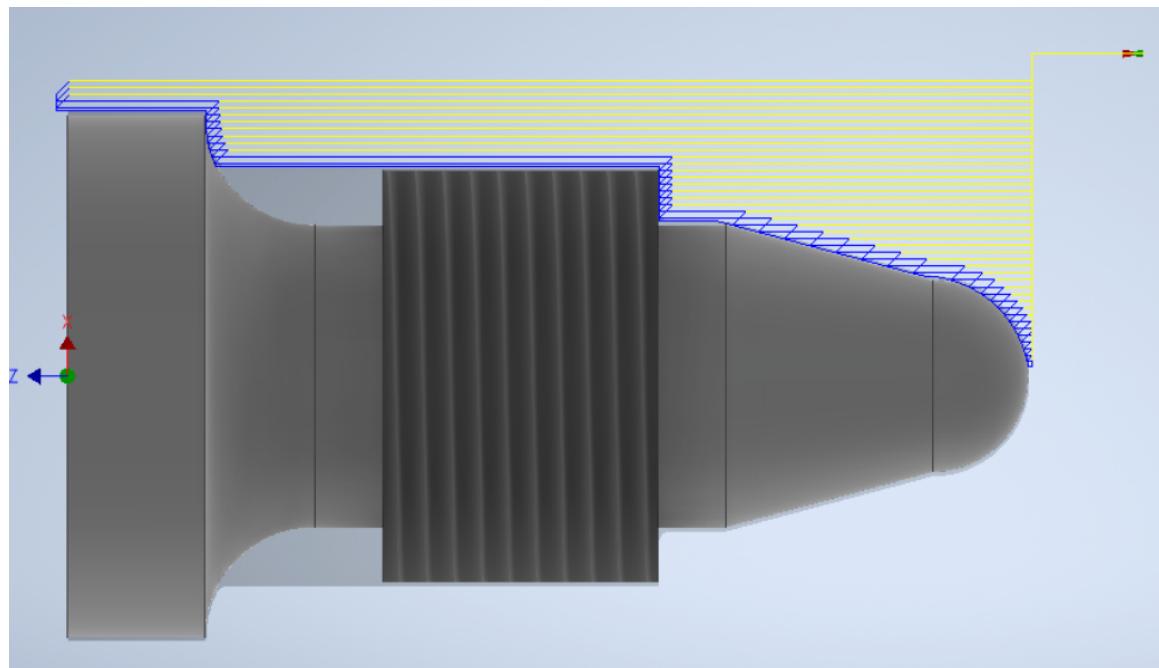


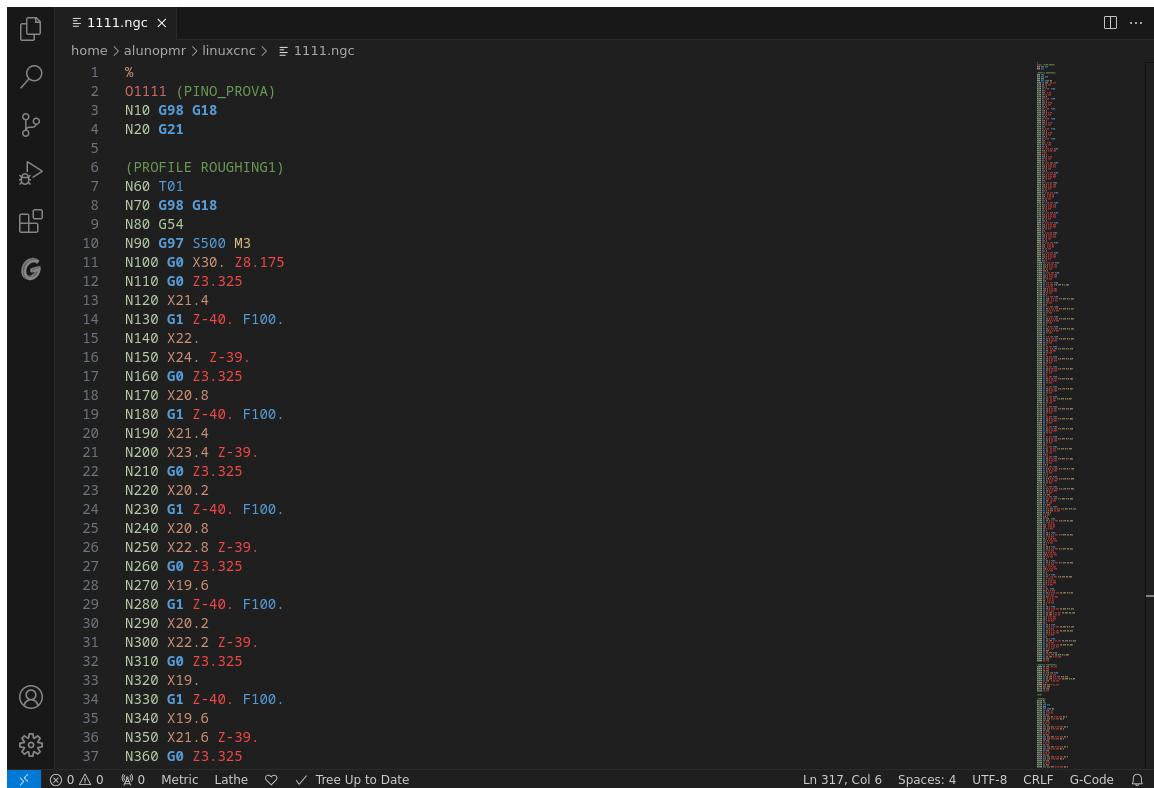
Figura 20 – Caminho de desbaste gerado para a peça final

5.3.2 Tratamento do código G gerado

Como os códigos gerados automaticamente não foram muito extensos, o grupo de programação lançou mão de revisões manuais para correção de eventuais erros. Erros

comuns como o programa gerar códigos utilizando o código G32 (não suportado pelo LinuxCNC) ou utilizar coordenadas com nomenclatura U e W ao invés de X e Z podem ser facilmente resolvidos com o uso de uma função de encontrar e substituir, muito comum em editores de texto modernos.

Para o ajuste de parâmetros de usinagem pontuais, como por exemplo velocidades, adição ou remoção de pausas para troca de ferramenta, e profundidades de corte, também se buscou usar de edições manuais no código, evitando a modificação de simulações no CAM ao máximo, apenas por uma questão de praticidade. Para tanto, o grupo instalou na máquina designada o editor Vscode, jundo de uma extensão que destaca sintaxe de código G.



```

1 %
2 O1111 (PINO_PROVA)
3 N10 G98 G18
4 N20 G21
5
6 (PROFILE ROUGHING1)
7 N60 T01
8 N70 G98 G18
9 N80 G54
10 N90 G97 S500 M3
11 N100 G0 X30. Z8.175
12 N110 G0 Z3.325
13 N120 X21.4
14 N130 G1 Z-40. F100.
15 N140 X22.
16 N150 X24. Z-39.
17 N160 G0 Z3.325
18 N170 X20.8
19 N180 G1 Z-40. F100.
20 N190 X21.4
21 N200 X23.4 Z-39.
22 N210 G0 Z3.325
23 N220 X20.2
24 N230 G1 Z-40. F100.
25 N240 X20.8
26 N250 X22.8 Z-39.
27 N260 G0 Z3.325
28 N270 X19.6
29 N280 G1 Z-40. F100.
30 N290 X20.2
31 N300 X22.2 Z-39.
32 N310 G0 Z3.325
33 N320 X19.
34 N330 G1 Z-40. F100.
35 N340 X19.6
36 N350 X21.6 Z-39.
37 N360 G0 Z3.325

```

Figura 21 – Vscode com um código sendo editado

Assim como o qjoypad, a instalação do Vscode foi feita através da instalação de um snap da snapstore.

5.4 Procedimento de usinagem

Idealmente, o grupo se reuniria para que os membros que soubessem operar a máquina repassassem esse conhecimento para os demais, o que de fato foi feito diversas vezes. Dito isso, o grupo de programação decidiu criar um manual de manuseio da máquina, de modo que todos pudesse estudar a máquina no horário que pudessem, evitando assim

que a absência de membros do grupo por motivos adversos prejudicasse os demais. O procedimento descrito nos subtópicos a seguir é um resumo desse manual.

5.4.1 Tratamento Inicial da Peça: Desbaste e Faceamento

Antes de executar códigos G complexos, é essencial preparar a peça para a usinagem por meio de operações de desbaste e faceamento. Essas etapas garantem superfícies regulares e dimensões iniciais adequadas para a peça.

5.4.2 Posicionamento Manual da Ferramenta

Para ambas as operações, o operador deve posicionar a ferramenta manualmente:

- Utilize o controle manual (Joystick ou teclado) para aproximar a ferramenta da peça.
- Ajuste a velocidade de avanço (Jog Speed) para um valor seguro, geralmente entre 20 e 50 mm/s.
- Posicione a ferramenta próximo à superfície da peça, garantindo uma pequena folga para evitar colisões.

5.4.2.1 Desbaste

O desbaste remove o excesso de material da superfície externa da peça, garantindo uniformidade ao diâmetro. Procedimentos principais:

- Mova a ferramenta lateralmente ao longo do eixo Z, mantendo o eixo X fixo.
- Realize cortes sucessivos, reduzindo gradualmente o diâmetro até atingir o valor desejado.
- Monitore visualmente o processo e ajuste a velocidade de avanço conforme necessário.

5.4.2.2 Faceamento

O faceamento nivela a face da peça, removendo irregularidades. Etapas:

- Posicione a ferramenta próxima à extremidade frontal da peça.
- Mova a ferramenta ao longo do eixo X, com o eixo Z fixo.
- Realize cortes suaves e uniformes até que toda a face da peça esteja nivelada.

Ambas as operações devem ser realizadas com cuidado para evitar colisões e assegurar que a peça esteja firme na placa de fixação.

5.4.3 Configuração Inicial do Ambiente de Programação

Antes de iniciar a programação efetiva do torno, é preciso preparar o ambiente de execução do LinuxCNC. Alguns pontos-chave:

- **Ligaçāo dos dispositivos:** É recomendável que a caixa de controle da máquina esteja ligada e o Joystick conectado antes da inicialização do computador. Isso previne problemas de detecção de periféricos pelo LinuxCNC.
- **Login e Sistema:** Após ligar o computador (com caixa de controle já energizada), efetua-se o login no sistema operacional.
- **Execuçāo do LinuxCNC:** Com o LinuxCNC aberto, deve-se selecionar a configuração apropriada do torno. Uma vez carregada a interface principal, o usuário pode então dar início à programação e à interação com o ambiente de usinagem.

5.4.4 Referenciamento (Homing) e Modos de Coordenadas

Um passo fundamental na etapa de programação é o homing dos eixos (X e Z). Esse processo estabelece a posição de referência absoluta da máquina, conhecida como zero máquina, imprescindível para qualquer subsequente programa em código G.

Após realizar o homing, o usuário pode definir planos de corte (por exemplo, G54) e zeros de peça, garantindo que o código G seja interpretado corretamente em relação à posição física da ferramenta e do tarugo a ser usinado.

5.4.4.1 Definição do Zero Peça

Definir o zero peça envolve posicionar a ferramenta em contato com o material e, através de recursos do LinuxCNC (como o apalpador), informar ao controlador o deslocamento necessário. Para o eixo Z, posiciona-se a ferramenta na face do tarugo; já para o eixo X, é necessário conhecer o diâmetro do tarugo. Essa informação garante que o código G seja interpretado corretamente, especialmente ao trabalhar em modo de diâmetro (G7).

O correto ajuste do zero peça é determinante para assegurar que o caminho programado no código G resulte em movimentos seguros e precisos, evitando colisões e garantindo o correto posicionamento da ferramenta em relação à geometria desejada.

5.4.5 Carregando e Executando Código G

A programação do torno CNC via LinuxCNC baseia-se na leitura e execução de arquivos com extensão *.ngc*, contendo instruções G-code. Após ajustar o zero peça e

conferir se o modo de diâmetro (G7) está ativado quando necessário, o usuário pode abrir o arquivo desejado:

- **Seleção do Programa:** Através da interface gráfica do LinuxCNC, o usuário seleciona o arquivo *.ngc* a ser executado.
- **Pré-visualização:** Antes da execução, o preview mostra o caminho da ferramenta, permitindo checar visualmente se o trajeto faz sentido.
- **Execução:** Ao dar início à execução, o LinuxCNC seguirá as instruções do código G, respeitando parâmetros de avanço, velocidade e comandos de mudança de ferramenta.

Durante este processo, é possível ajustar fatores como a velocidade máxima de execução, garantindo maior segurança caso haja incerteza sobre o comportamento do programa.

5.5 Desafios encontrados

Além dos problemas recorrentes e simples de serem solucionados, como por exemplo o ajuste de códigos G (ou até mesmo eventuais modificações em um CAM) além de afiações e ajustes de ferramenta para garantir que o torno produzisse resultados adequados, o grupo de programação deve de superar alguns desafios que merecem destaque. Nos subtópicos a seguir estes desafios serão listados e discutidos.

5.5.1 Modo de diâmetro (G07)

Sem dúvidas esse foi o erro que custou mais tempo do grupo de programação (cerca de uma semana para a solução). Esse erro foi observado pela primeira vez ao se tentar produzir uma peça com um raio esférico na sua ponta, o que gerou uma mensagem de erro que indicava o que aparentemente eram dois raios distintos e conflitantes no código.

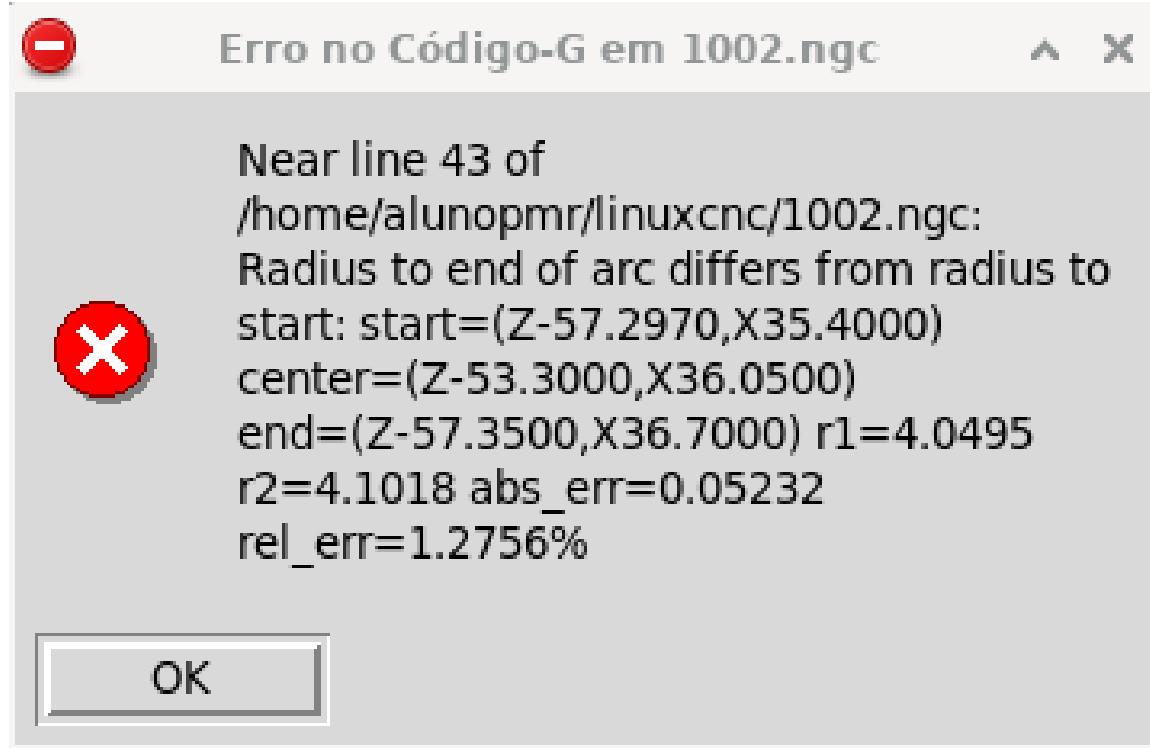


Figura 22 – Erro apresentado quando G07 não está ativo

O fato de que ninguém para o qual nós apresentamos esse erro pôde identificar erros no código G indicou para o grupo que havia um erro desconhecido ocorrendo no interpretador do LinuxCNC. Como nada do que foi tentado funcionou, a medida de trocar o computador e copiar a configuração de ambiente de outro grupo que teve seu sistema operacional atualizado foi tomada, porém isso não solucionou o problema.

No fim, o grupo descobriu, ao observar a indicação da posição do eixo X na interface gráfica, que o comportamento padrão do LinuxCNC presente na máquina era de ter o modo de coordenadas em raio ativado, o que é incomum para códigos de usinagem CNC. Assim, a única solução encontrada foi a ativação do código G07 a partir do MDI antes de carregar qualquer código G.

Além do tempo necessário para finalmente descobrir a causa real do problema, a maior parte do tempo gasto devido a esse erro veio do fato de o grupo ter de configurar o ambiente de execução novamente devido a troca de computador. Além disso, essa troca foi a causa do próximo problema que será discutido.

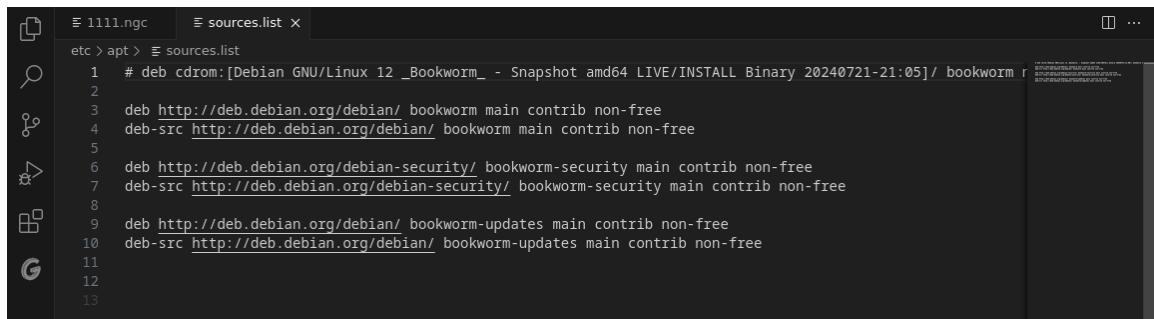
5.5.2 Instalação do qjoypad

Inicialmente o programa qjoypad já estava instalado na máquina que o grupo recebeu, de modo que o trabalho de configurar o controle manual se resumiu à apenas mapear os comandos no aplicativo. No entanto, devido a troca de computador e atualização

de sistema operacional, o programa teve de ser instalado novamente.

O processo de instalação do aplicativo original, disponível na Source Forge, é simplesmente a sua compilação a partir dos arquivos fonte. Porém isso não foi possível, pois o sistema operacional recentemente instalado não possuía uma ferramenta de compilação chamada de **qmake**, a qual tinha um processo de instalação que precisaria de internet para ser viável.

Já com acesso a internet, por meio de roteamento à partir de telefones móveis, foi constado que a instalação de qualquer pacote seria muito dificultada pois o sistema não tinha nem uma lista dos repositórios remotos padrões do Debian, provavelmente devido ao tipo de instalação feita (totalmente offline). Finalmente ao achar o arquivo de configurações de fontes remotas do Debian, foram adicionadas as seguintes fontes:



```

etc > apt > sources.list
1  # deb cdrom:[Debian GNU/Linux 12 _Bookworm_ - Snapshot amd64 LIVE/INSTALL Binary 20240721-21:05]/ bookworm
2
3  deb http://deb.debian.org/debian/ bookworm main contrib non-free
4  deb-src http://deb.debian.org/debian/ bookworm main contrib non-free
5
6  deb http://deb.debian.org/debian-security/ bookworm-security main contrib non-free
7  deb-src http://deb.debian.org/debian-security/ bookworm-security main contrib non-free
8
9  deb http://deb.debian.org/debian/ bookworm-updates main contrib non-free
10 deb-src http://deb.debian.org/debian/ bookworm-updates main contrib non-free
11
12
13

```

Figura 23 – Repositórios remotos adicionados

Com essas fontes instaladas, foi possível instalar a snapstore e, a partir dela, um snap de um fork mais novo do qjoypad, com as mesmas funcionalidades do original.

5.5.3 Reconhecimento de periféricos

Esse problema se manifesta pelo fato do LinuxCNC instalado na primeira máquina que o grupo recebeu não procurar por periféricos após a inicialização, o que significa que qualquer dispositivo que o grupo quisesse conectar em alguma porta USB, como por exemplo o Joystick ou um pendrive, deveria ser conectado antes da inicialização. Esse problema simplesmente entrou para o procedimento de usinagem como um aviso de conectar tudo antes de ligar o computador.

Após a troca de computador, no entanto, o LinuxCNC se tornou capaz de reconhecer periféricos conectados após a inicialização, então o problema foi definitivamente resolvido após a atualização.

6 Próximos passos

Referências

BLEVINS, R.D. **Formulas for Natural Frequency and Mode Shape.** [S.l.]: Krieger Publishing Company, 2001. ISBN 9781575241845. Disponível em:
[<https://books.google.com.br/books?id=ee1_AAAACAAJ>](https://books.google.com.br/books?id=ee1_AAAACAAJ).

NYLON 6.0 DATASHEET. [S.l.: s.n.]. /mnt/data/datasheet-nylon60-roc.pdf. Revisão 1.0, Julho/2018, Accessed: 2024-09-12.

CATÁLOGO MOTORES DE PASSO KALATEC. [S.l.: s.n.]. /mnt/data/1586457700Catalogo-Motores-de-Passo-Kalatec-100420.pdf. Revisão 1.0, Abril/2020, Accessed: 2024-09-12.

7 Anexos