

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 |

Lista de tabelas

Tabela 1 – Correlação entre Massa Móvel, Torque e Velocidade Angular 10

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 |
| 4 | PRÓXIMOS PASSOS | 20 |
| | Referências | 21 |
| 5 | ANEXOS | 22 |

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

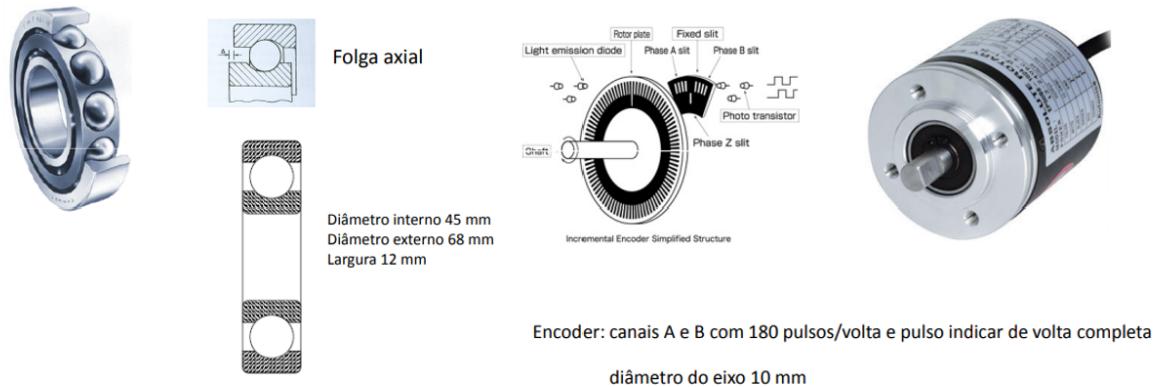
O eixo árvore especificado para a máquina é composto por uma placa de três castanhas para fixação da peça, perfil tubular de aço com seção quadrada de 100 mm de lado e 3,18 mm de parede, rolamentos radiais de esferas, polia para correia sincronizadora e encoder óptico.

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.

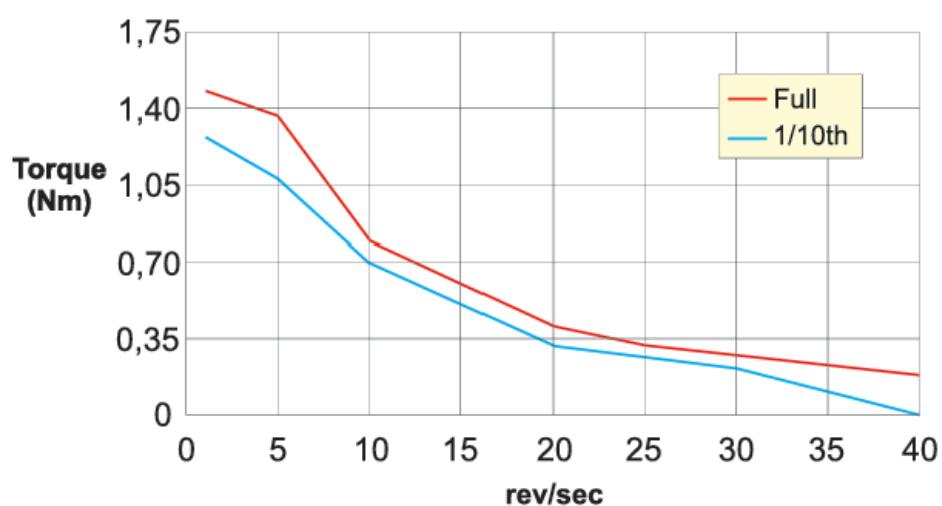


Figura 1 – Curva de torque do motor de passo KTC-HT23-400 (CATÁLOGO MOTORES DE PASSO KALATEC..., s.d.).

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.

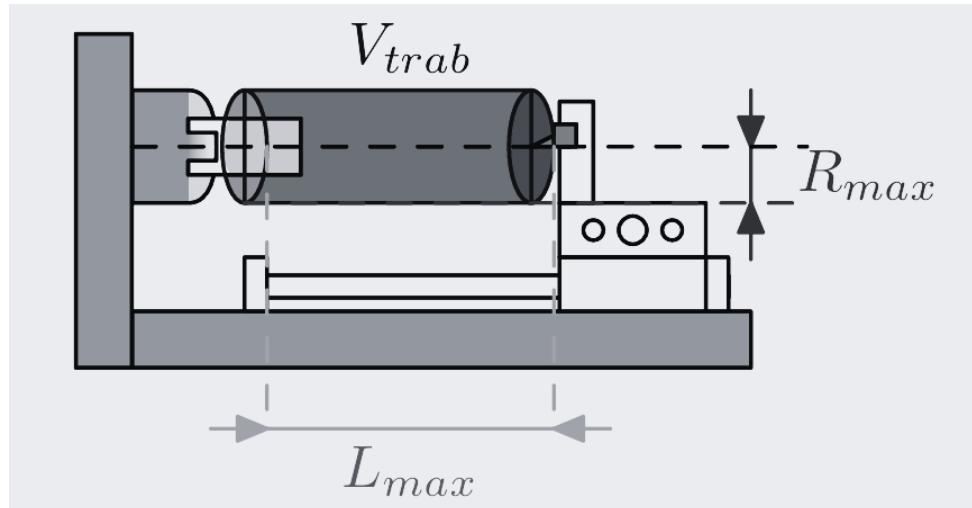


Figura 2 – Representação gráfica do cálculo de volume de trabalho. Fonte: Autor.

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

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

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.

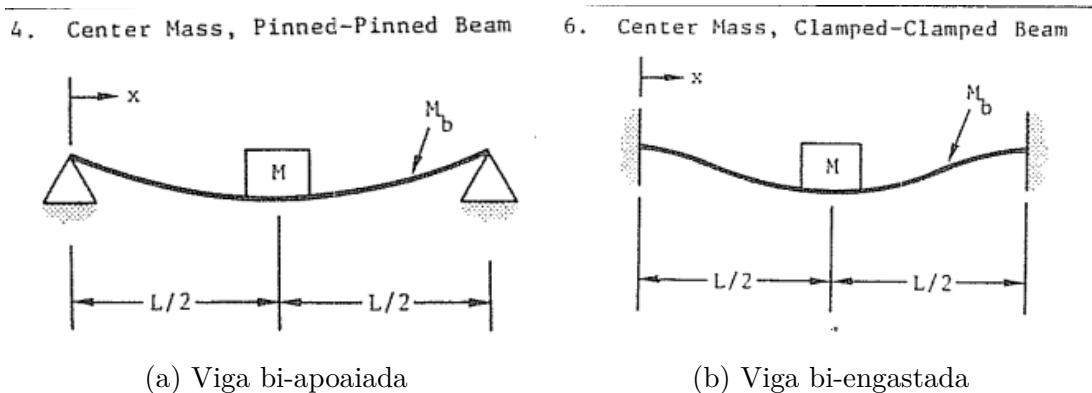


Figura 5 – Modelos de viga esbelta com massa central. Fonte: (BLEVINS, 2001)

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 crítico 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

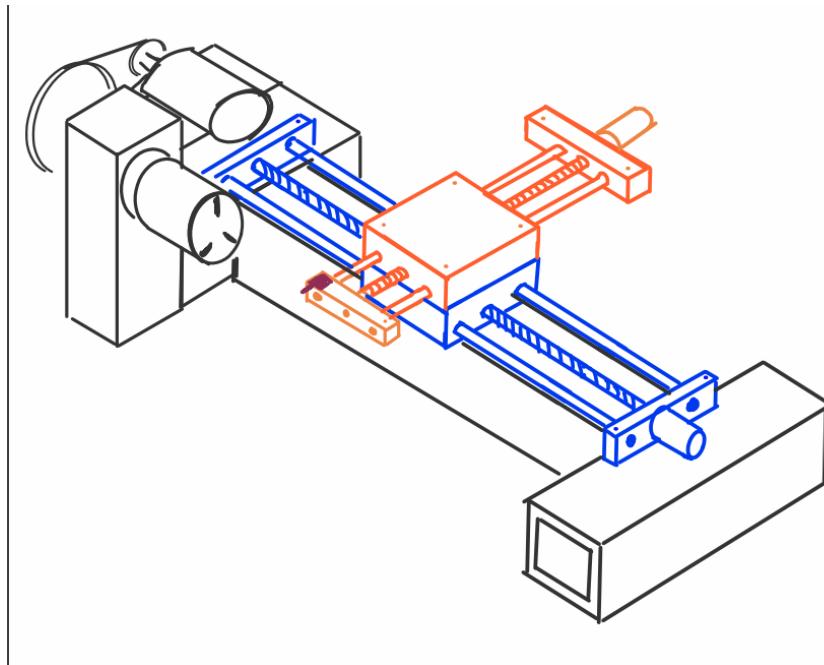


Figura 6 – Esboço manual da primeira solução. Fonte: Autor.

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

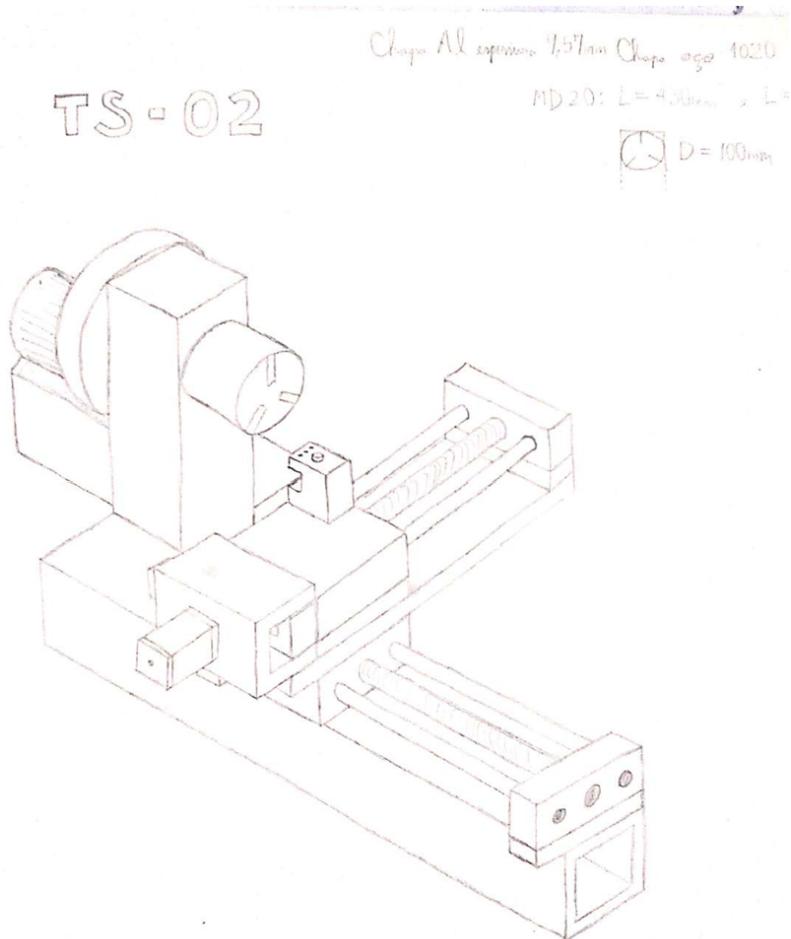


Figura 7 – Esboço manual da segunda solução. Fonte: Autor.

3.3.1 Peso

3.4 Solução 3

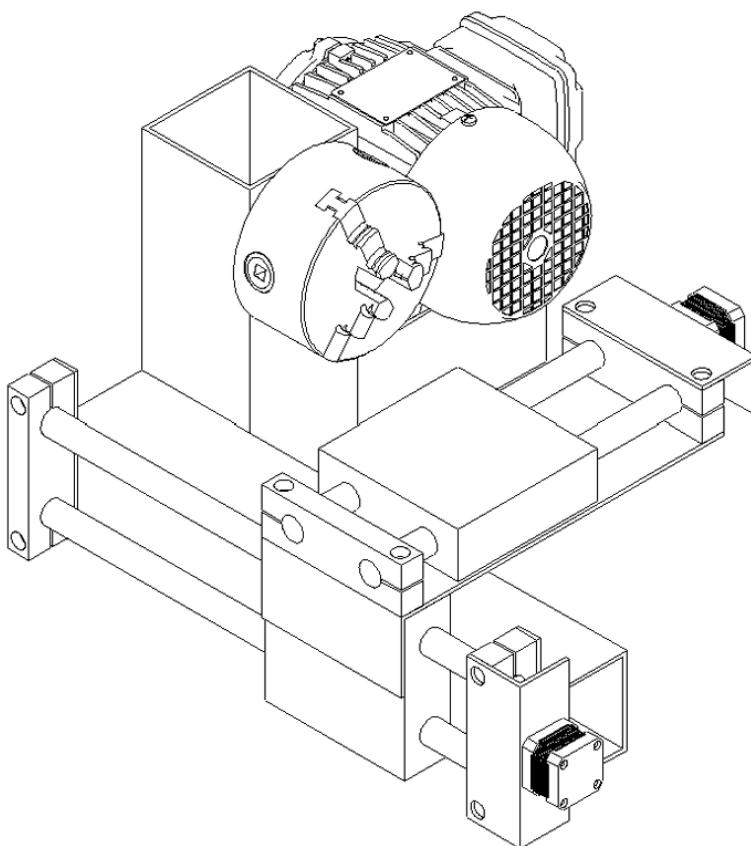


Figura 8 – Esboço da terceira solução. Fonte: Autor.

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

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. ??) e do desenvolvido no KiCad (Fig. ??).

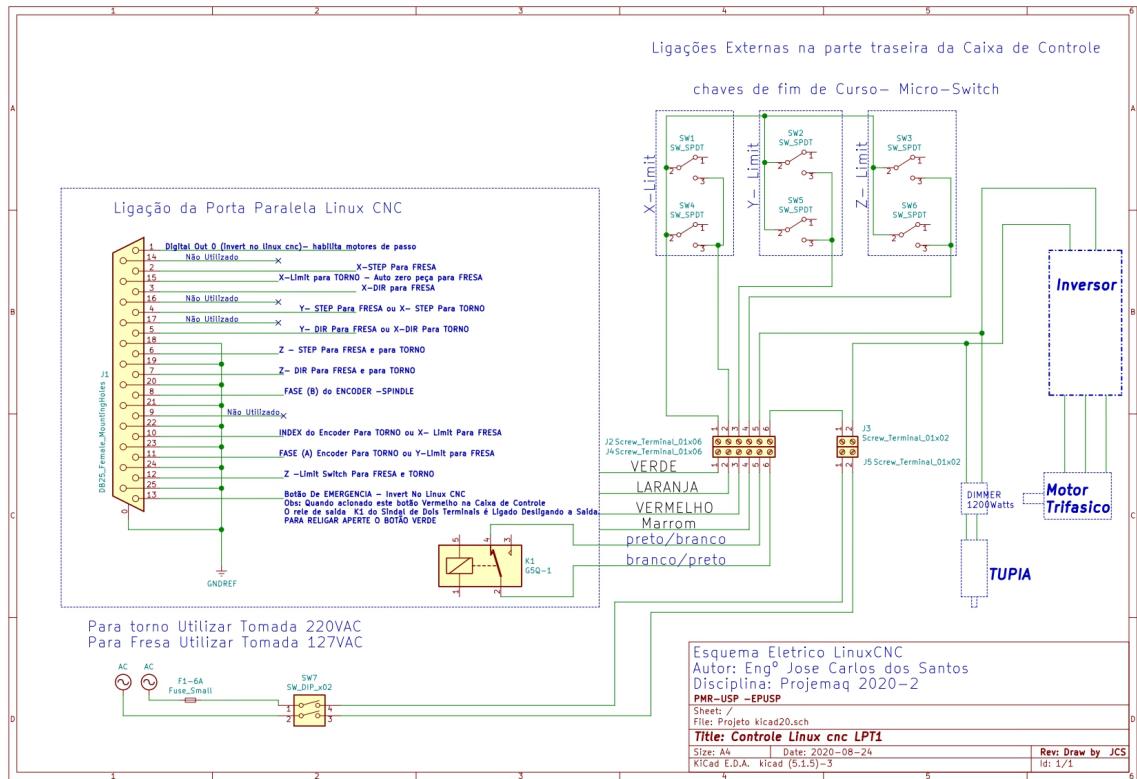


Figura 9 – Esquema elétrico fornecido pelo professor

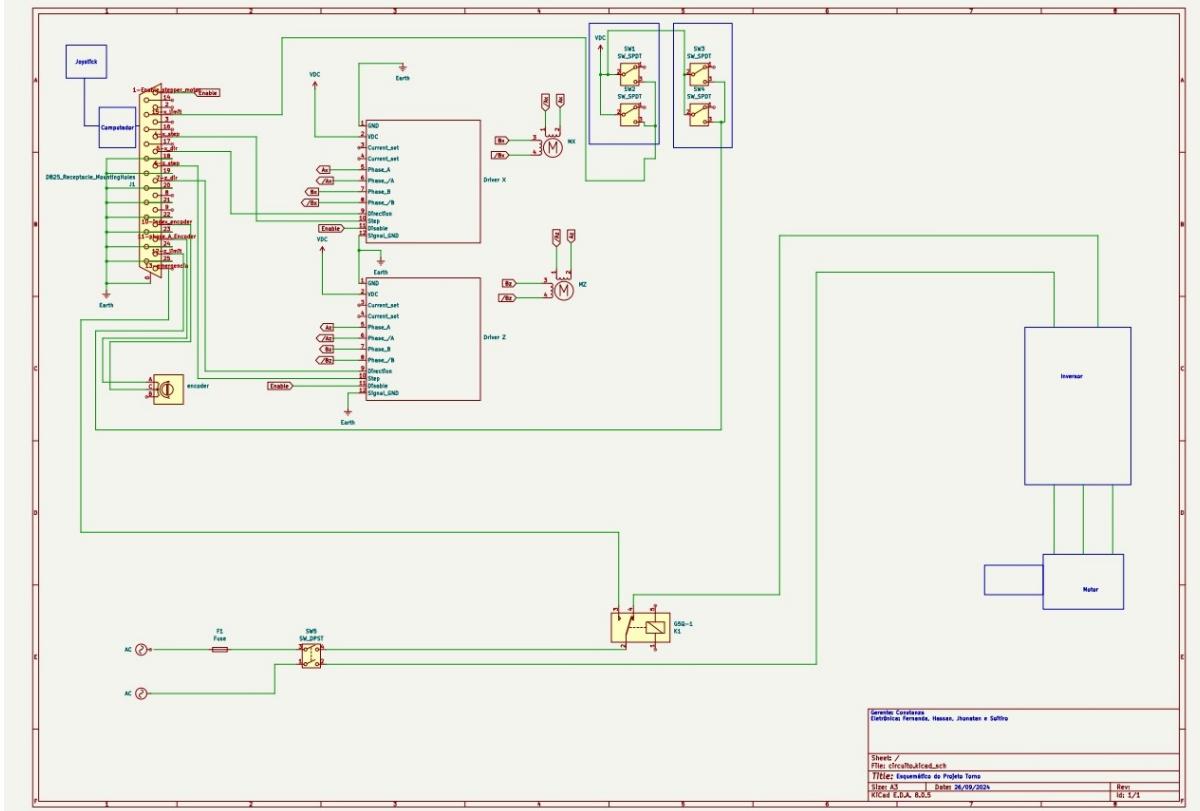


Figura 10 – Esquema elétrico desenvolvido no KiCad

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. ?? mostra a montagem realizada para o teste.

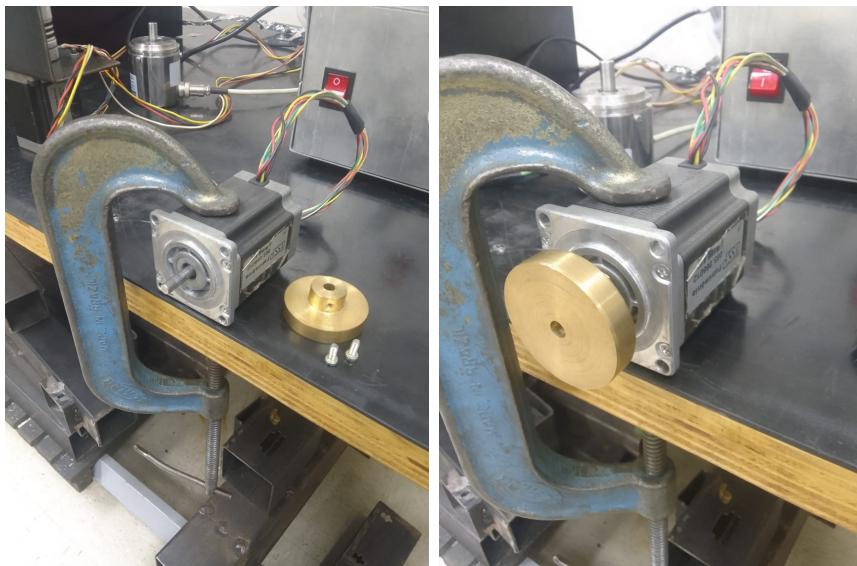


Figura 11 – Motor de passo que controla o movimento no eixo Z antes e depois do acoplamento da carga de latão.

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.

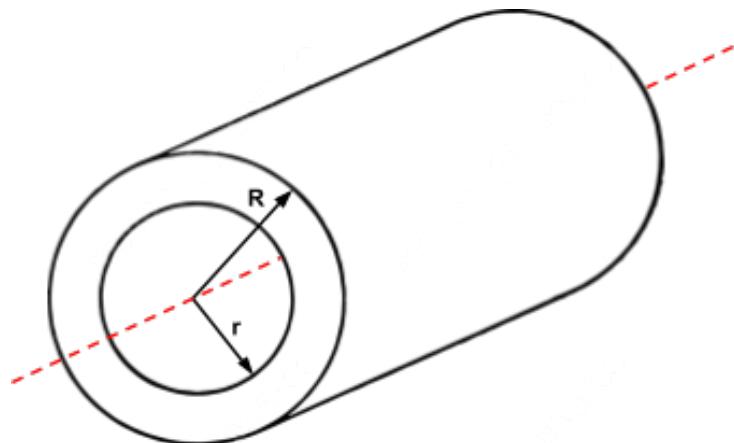


Figura 12 – Modelo do cilindro oco, para cálculo do momento de inércia de massa.

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. ??:

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

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

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

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. ??, ?? e ??, foi possível obter os dados necessários, apresentados na Tab. ??.

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

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

Tabela 2 – 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. ?? 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 3 – 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. ??).

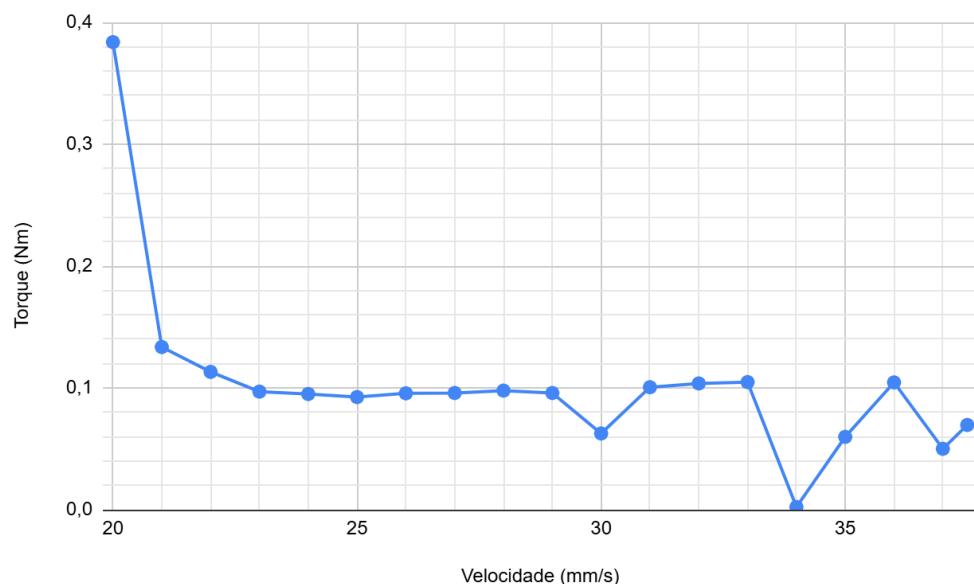


Figura 13 – Gráfico do Torque (Nm) x Velocidade Linear (mm/s)

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.

5 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.

6 Anexos