

MINI TORNO CNC CONTROLADO POR ARDUINO COMO PROJETO INTEGRADOR NO CURSO DE ENGENHARIA

PEDRO AUGUSTO PAVANI BENEVENUTO - pedro.benevenuto016@gmail.com

PEDRO HENRIQUE MALANDRINO CLEMENTE – pedro93.hmc@gmail.com

RODOLFO MOINO GOMES DA SILVA - ro.moino@hotmail.com

PROF. DR. Sérgio Luís Rabelo de Almeida (Orientador) – srabelo@terra.com.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o projeto e construção de um mini torno CNC controlado por Arduino para aplicação didática dentro da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Este projeto foi elaborado buscando-se a redução de custos e a facilidade durante os processos de usinagem realizados. O projeto foi dividido em três partes: mecânico, eletrônico e o controle por software. No projeto mecânico foram feitas as especificações do material a ser usinado e que compôs o corpo da máquina, além do dimensionamento dos elementos de máquina. As peças que compõe o torno em sua maioria foram usinadas nos laboratórios de usinagem da própria universidade. O projeto eletrônico consistiu na escolha do microcontrolador, dos motores de passo e drivers desses motores e na seleção do motor que aciona o eixo árvore da máquina. Para o projeto de software, definiu-se o software CAD para o desenho da peça, o pós-processador e o software de controle, que transforma os comandos os códigos G em sinais elétricos que são enviados para o microcontrolador. Após as definições dos parâmetros de funcionamento, foram calculadas as forças de usinagem que possibilitaram o dimensionamento mecânico da máquina. Em paralelo foram definidos os programas que seriam utilizados para desenho, pós-processamento e controle da máquina. Finalizada a usinagem das peças, fez-se a montagem da máquina e deu-se início aos testes, e ao final foi possível se obter um modelo de máquina e de projeto integrador para os cursos de engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Palavras-chave: CNC. Integrador. Torno

MINI TORNO CNC CONTROLADO POR ARDUINO COMO PROJETO INTEGRADOR NO CURSO DE ENGENHARIA

ABSTRACT

This Project was designed to build a small CNC lathe controlled by an Arduino for didactical application inside the School of Engineering Universidade Presbiteriana Mackenzie. It was designed thinking about costs reduction and machining process and it was divided in three parts: Mechanical, Electronic and Software control. In the Mechanical project, the material specifications were made and also the scaling of the machine parts. The parts that compound the lathe were machined in the machine labs of the College. The Electronic part consists in choosing a microcontroller, stepper motor with its drivers and selecting a motor to trigger the spindle. For the Software part, CAD had been chosen to draw the pieces, post processor to generate the G-code and the CNC controler software that transform the G-code into eletrics signals and send to the microcontroler. With the operational parameters, the calculation of the machining forces that enable the mechanical sizing of the lathe were done. With the machinig of the parts done and the assemble of the electronics completed the tests were started, and in the end was possible to build a model of the small CNC lathe for didactical applicaton inside the School of Engineering Universisdade Presbiteriana Mackenzie.

Keywords: CNC. Integrator. Lathe

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho teve como objetivo trazer aos alunos da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), dos cursos da Escola de Engenharia (E.E.), um projeto que envolve diversas áreas do conhecimento e que devem ser empregadas em conjunto para que possa ser concluído. Houve um diálogo entre o professor orientador e os alunos envolvidos de forma a estimular a reflexão sobre os problemas a serem enfrentados, possibilitando a criação de um conhecimento conjunto e integrado.

Como projeto integrador, esse trabalho irá oferecer aos estudantes a oportunidade de colocar em prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, bem como obter experiência de como ocorre o processo de criação de um produto, desde a sua concepção até o modelo final, e a integração que é necessária entre as diversas áreas para que ele funcione.

Uma série de disciplinas podem ser associadas a esse projeto. Apenas da Engenharia Mecânica seria possível citar quase que a matriz curricular inteira do curso, que engloba desenho de elementos de máquina, construção de máquinas, materiais de construção mecânica, entre muitas outras. Matérias como “Linguagem de programação”, “Mecânica geral 1 e 2”, “Resistência dos materiais 1” são comuns a todos os cursos e estão associadas a esse projeto. Sendo mais específico com relação ao curso de Engenharia de Produção, é possível utilizar os conhecimentos de “Engenharia da qualidade e metrologia” e “Inovação e desenvolvimento de produto”. Os alunos do curso de Engenharia Elétrica poderão aplicar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas de “Microprocessadores”, “Eletrônica aplicada” e “Controle de servomecanismos”.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Ao se pensar em produzir algo, por exemplo uma máquina, é necessário se pensar, ao mesmo tempo, em algumas questões do tipo: para que ela será feita? Qual o objetivo a ser cumprido por ela? Como ela será feita e quais os métodos utilizados para a sua fabricação? Quem irá fazê-la? Essas questões levam a uma complexidade de pensamentos que envolvem diferentes tipos de conhecimentos e informações. Atualmente, quando se pensa em realizar um projeto é necessário que haja uma equipe para fazê-lo, cada um com a sua responsabilidade e conhecimento específico para que o objetivo final seja alcançado. A máquina do começo desse parágrafo irá necessitar de um desenho, esquemas elétricos e, talvez, pneumáticos ou hidráulicos, peças que serão fabricadas, elementos de fixação, rolamentos, muito cálculo entre outras coisas para o seu funcionamento. Cada elemento da equipe deve se utilizar dos conhecimentos na sua área, e todo esse conhecimento será utilizado de forma integrada para se alcançar o objetivo final do projeto. E a boa integração desse conhecimento determinará se a máquina irá ou não funcionar.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e construir um mini torno CNC controlado por Arduino para aplicação didática dentro da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Criar um conceito da máquina a partir de um estudo sobre os ornos CNC.

Projetar os elementos de máquina, tais como o eixo árvore, rolamentos e fusos e selecionar os motores dos carros longitudinal e transversal, selecionar o motor de acionamento do eixo árvore

Projetar o sistema de controle de máquina. Definir qual será o microcontrolador utilizado, selecionar os drivers de controle dos motores e definir quais serão os softwares de desenho, pós-processamento e de controle da máquina.

Fazer a calibração da máquina e testar o funcionamento do conjunto.

Gerar a documentação da máquina.

2 METODOLOGIA

O projeto foi dividido em 5 partes: desenvolvimento do conceito da máquina, cálculos de usinagem, dimensionamento dos elementos de máquina, projeto de controle da máquina e montagem e teste.

2.1 PROJETO CONCEITUAL

A concepção da máquina teve como premissa os seguintes requisitos:

- Ter medidas máximas de 200 x 80 mm, quando vista em planta
- Ser capaz de usinar alumínio
- Ter uma rotação no eixo árvore de 1000 rpm
- Capaz de usinar um tarugo $\varnothing 16 \times 70$ mm
- Ter um custo máximo de R\$500,00

O conceito desenvolvido da máquina é mostrado na figura 1 abaixo.

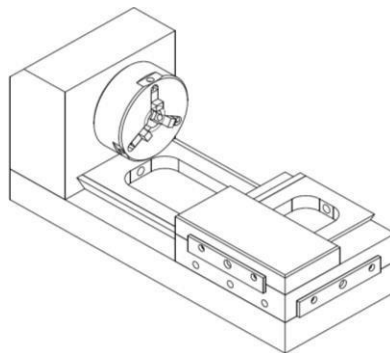


Figura 1: primeiro conceito do mini torno (Fonte: acervo próprio).

O projeto iniciou-se com uma pesquisa a respeito dos tornos mecânicos e tornos CNC, a forma como funcionam, diferenças e igualdades, bem como modelos de mini tornos construídos por entusiastas e outros estudantes. Existem diversos projetos de fresas e impressoras 3D feitos por pessoas e que disponibilizam vídeos na internet ou até um manual do projeto. Esses projetos foram essenciais para que se pudesse moldar o conceito inicial do torno para o que ele se tornou no final.

Para a movimentação dos carros estudou-se algumas soluções possíveis como utilizar guias no formato de rabo de andorinha, guias lineares na forma de patins e guias cilíndricas com o rolamentos lineares. Por uma questão de custos e de facilidade de usinagem, foram utilizadas guias cilíndricas com rolamentos lineares, como mostrado na figura 2. A movimentação é feita através de fusos acionados por motores de passo.



Figura 2: guias lineares cilíndricas com rolamento linear (Fonte: acervo próprio).

O sistema de fixação do tarugo foi feito tomando como exemplo as pinças de fixação de ferramenta de fresadoras. Esse sistema foi dividido em três partes: eixo-árvore (onde a pinça é inserida), a pinça e a porca de aperto. Esse sistema é mostrado na figura 3.

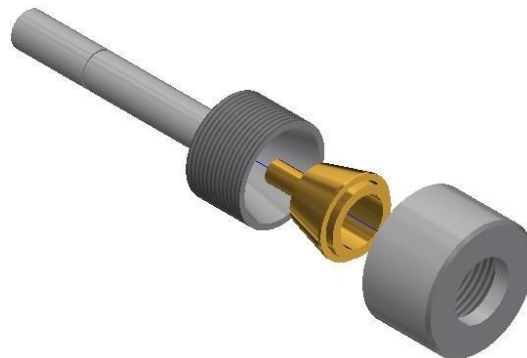


Figura 3: vista explodida do sistema de pinças do eixo árvore
(Fonte: acervo próprio).

O carro longitudinal foi elaborado para que pudesse ser utilizado com a guias cilíndricas junto com o rolamento linear. Para tanto, há o alojamento dos rolamentos bem como os furos para a fixação de uma tampa para que não escapem, o que também dificulta a entrada de quaisquer materiais que possam atrapalhar o seu funcionamento.

O carro transversal e o castelo foram feitos como sendo a mesma peça. O conjunto carro longitudinal-carro transversal é mostrado na figura 4.

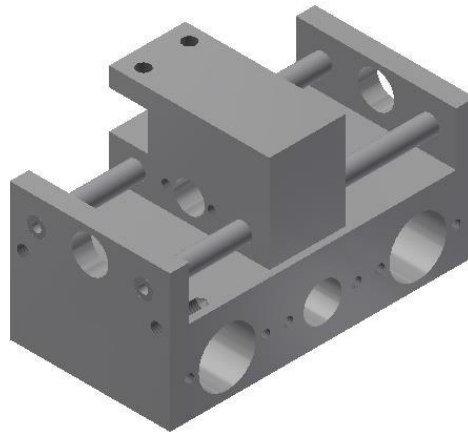


Figura 4: carro transversal (Fonte: acervo próprio).

As figuras 5 mostra o conceito final do torno junto com algumas medidas externas.

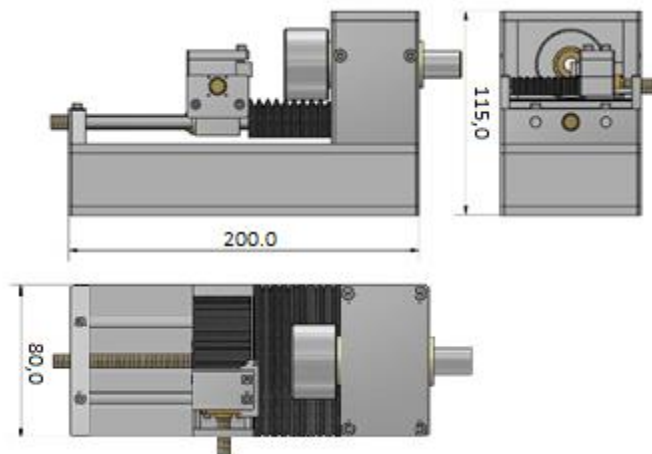


Figura 5: conceito final da máquina (Fonte: acervo próprio).

3.2 CÁLCULOS DAS FORÇAS DE USINAGEM, POTÊNCIAS E VELOCIDADES

A força de corte (F_c) é dada pela fórmula de Kienzle abaixo, que é “bastante simples e suficientemente precisa para os cálculos práticos da força de usinagem” (FERRARESI, 1977). A força de corte é igual a:

$$F_c = k_c \cdot 1 \cdot b \cdot h^{1-z} \text{ (N)}$$

Onde b é a largura de usinagem, h é a espessura de usinagem e z é uma propriedade do material obtida experimentalmente, sendo igual 0,25 para o alumínio. Para calcular a largura de corte é necessário escolher um valor para a profundidade de corte (a_p), e para calcular a espessura de corte também é necessário fixar o valor do avanço (f). Além disso é necessário especificar também o valor do ângulo de corte. A largura de corte (b) e a espessura de corte (h) podem ser calculadas pelas equações abaixo.

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}K_r} \text{ (mm)}$$

$$h = f \cdot \text{sen}K_r \text{ (mm)}$$

Além da força de corte, outras forças também devem ser consideradas, pois contribuem para a potência de usinagem. Elas são decomposições da força de usinagem F_u , que “é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem” (FERRARESI, 1977). A figura 6 ilustra essas forças durante o processo de torneamento.

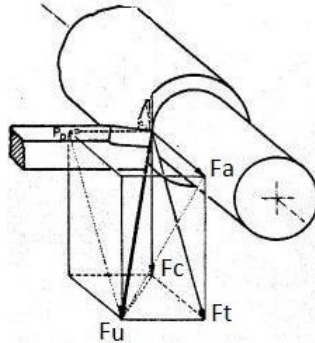


Figura 6: disposição das forças durante o torneamento externo. (Fonte: Ferraresi (1977)).

Nesta figura, F_t é a força ativa, que é a projeção de F_u sobre o plano de trabalho, F_a é a força de avanço, que é a projeção de F_u sobre a direção de avanço, F_c é a projeção de F_u sobre a direção de corte, dada pela velocidade de corte v_c , e F_{ap} é a força de apoio, que é a projeção de F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho. Segundo Ferraresi (1977), no torneamento tem-se as seguintes relações entre as forças de corte, de avanço e de apoio.

$$F_c \cong 4,5 * F_a \text{ (N)}$$

$$F_{ap} \cong 0,4 * F_c \text{ (N)}$$

A potência de corte pode ser calculada pela equação:

$$P_c = \frac{F_c * v_c}{10 * 60 * 75} \text{ (CV)}$$

A velocidade de corte é dada pela equação abaixo, onde “ d ” é o diâmetro do tarugo em mm e “ n ” é rotação em rpm.:

$$v_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \left(\frac{\text{m}}{\text{mín}} \right)$$

No torneamento, a potência que deverá ser entregue pelo motor que rotaciona o eixo árvore deve ser calculada a partir da soma das potências geradas pelas três forças que atuam na peça: F_c , F_a e F_{ap} . A equação abaixo mostra o cálculo da potência que deve ser fornecida pelo motor.

$$P_m = F_c * v_c + F_a * v_a + F_{ap} * v_{ap} \text{ (CV)}$$

Contudo, o valor de potência associado a força de corte é responsável pela maior parcela da potência efetiva de corte, podendo chegar a ser 1000 vezes maior do que as outras duas potências (a velocidade de corte “ v_c ” é dada em m/mín, enquanto que as outras duas velocidades são dadas em

mm/mín), e por isso F_c é chamada de força principal de corte. Para o cálculo da potência fornecida pelo motor (P_m) utiliza-se apenas a F_c dividida por um coeficiente η , que é o rendimento do motor. A equação abaixo mostra como é feito o cálculo da potência do motor. Neste projeto foi adotado $\eta = 0,75$

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \text{ (CV)}$$

2.3 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS DE MÁQUINA

A transferência de potência do motor principal para o eixo árvore foi feita através de um sistema de polias, o que gera um esforço no eixo, além daqueles esforços devido as forças de usinagem. O diâmetro do eixo foi calculado através da equação abaixo e depois a fadiga foi verificada utilizando-se o método descrito em Shigley (2005).

$$d \geq 2,17 * \sqrt[3]{\frac{b * M_i}{\sigma_{e_{adm}}}} \text{ (mm)}$$

O momento ideal “ M_i ” foi calculado utilizando a equação abaixo, onde “ M_f ” é o momento fletor máximo no eixo e “ M_t ” o momento torsor que atua no eixo, calculado por:

$$M_i = \sqrt{M_f^2 + \left(\frac{a}{2} * M_t\right)^2} \text{ (N. mm)}$$

$$M_t = 71620 * \frac{P_m}{n} \text{ (N. mm)}$$

Para os mancais de rolamento fez-se uma pré-seleção baseada nas dimensões do eixo e do alojamento do rolamento, e depois uma confirmação da possibilidade de utilização através dos métodos de dimensionamento de rolamentos descritos em Mott (2015). Para isso definiu-se a tempo de vida de rolamento e calculou-se as cargas dinâmicas básicas em cada mancal, comparando o valor obtido com o que é fornecido pelo fabricante do rolamento.

Os principais parâmetros para a escolha dos motores de passo foram: o tamanho do motor, o torque que ele é capaz de fornecer e o custo. O torque necessário foi dimensionado considerando que os fusos são parafusos de potência. O torque foi calculado pela equação abaixo.

$$T = \frac{F * d_p}{2} * \frac{(\mu * \pi * d_p + L * \cos\alpha)}{(\pi * d_p * \cos\alpha - \mu * L)} \text{ (N. mm)}$$

2.4 INTERFACE DE COMUNICAÇÃO COMPUTADOR-MÁQUINA E ELETRÔNICA

A figura 7 indica a sequência que deve ser seguida para se obter uma peça usinada numa máquina CNC. Primeiro o desenho em CAD, seguido pela geração do código G a partir desse desenho e a interpretação e envio do código como sinal elétrico para a máquina.

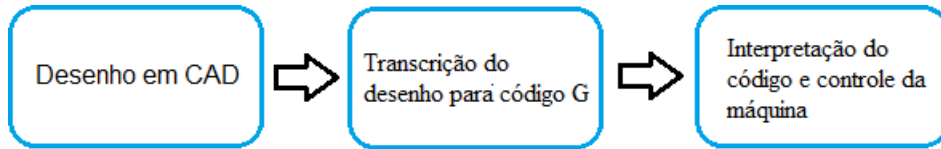


Figura 7: Sequência de passos para (Fonte: acervo próprio).

O microcontrolador Arduino foi escolhido para receber os sinais elétricos e então direcioná-los para os motores. Sua escolha é justificada, pois é de fácil aprendizado, baixo custo, além de ser um microcontrolador utilizado pelos alunos de Engenharia Elétrica e Mecatrônica nos laboratórios da universidade.

Porém, o Arduino por si só necessitaria de uma programação complexa para que fosse possível controlar a máquina através de um programa de controle CNC. Um *firmware* chamado GRBL foi instalado no Arduino com o propósito de fazer o controle da máquina. O GRBL foi desenvolvido para trabalhar com máquinas CNC, e é um programa gratuito e de bom desempenho.

Para o controle dos motores de passo foram selecionados *drivers* de potência que permitem controlar os motores de passo com precisão e regulam a tensão e corrente fornecida para esses motores. E o motor principal é controlado através de um relê para ligar ou desligar o motor. Para facilitar a montagem e otimizar o espaço utilizado pelo circuito foi utilizado ainda o CNC *Shield*, mostrado na figura 8 acoplado ao Arduino e com os drivers inseridos.

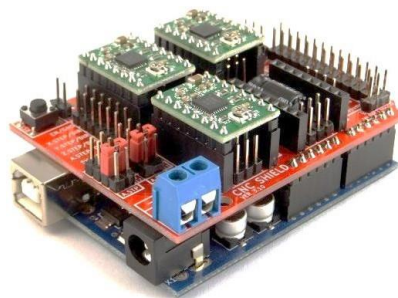


Figura 8: CNC *Shield* (placa vermelha), com 3 drivers A4988, acoplada ao Arduino

(Fonte blog.protoner.co.nz/arduino-cnc-shield/)

3 RESULTADOS

3.1 Elementos de máquina

Os parâmetros de corte estabelecidos foram os seguintes:

- $K_{c1.1} = 700 \text{ N/mm}^2$ (para alumínio)
- $a_p = 0,2 \text{ mm}$
- $f = 0,05 \text{ mm}$
- $K_r = 90^\circ$

Para esses parâmetros de usinagem, a largura de corte e a espessura de corte são respectivamente iguais a::

$$b = 0,2 \text{ mm}$$

$$h = 0,05 \text{ mm}$$

As forças de corte, de avanço e de apoio são iguais a:

$$F_c = 700 * 0,2 * 0,05^{1-0,25} \approx 14,8 \text{ N}$$

$$F_a \cong \frac{F_c}{4,5} \cong 3,29 \text{ N}$$

$$F_{ap} \cong 0,4 * F_c \cong 5,95 \text{ N}$$

Devido as dimensões da pinça que prende o tarugo, o diâmetro máximo da peça a ser usinada deve é igual a 16mm. Para esse projeto definiu-se uma rotação máxima de 1000rpm. Portanto a velocidade de corte é igual a:

$$v_c = 50,27 \text{ m/mín}$$

Com esse valor obetu-se para a potência de corte o valor de:

$$P_c = 0,017 \text{ CV} = 12,5 \text{ W}$$

Assim, a potência mínima do motor deve ser igual a:

$$P_m = \frac{0,017}{0,75} = 0,023 \text{ CV} = 16,7 \text{ W}$$

Com a potência e a rotação definidas foi possível iniciar o cálculo do dimensionamento do eixo-árvore. Os cálculos abaixo mostram o momento torsor que atua no eixo e a força que a polia exerce no eixo. T1 é a força no lado tensionado, enquanto que T2 é a foração no lado frouxo. T0 é a força resultante no eixo árvore.

$$M_t = (T_1 - T_2) * r$$

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\mu * \alpha}$$

Onde $\mu = 0,8$ e $\alpha = \pi \text{ rad}$. Após os cálculos temos que

$$T_1 = 17,54 \text{ N}$$

$$T_2 = 1,42 \text{ N}$$

$$T_0 = T_1 + T_2 = 18,96 \text{ N.}$$

Com todas as forças que agem sobre o eixo calculadas, o próximo passo foi calcular os momentos fletores máximos e onde eles estavam localizados. O comprimento máximo definido para o tarugo foi de 70mm. As figuras 9, 10 e 11 mostram a disposição das forças no eixo e os momentos fletores atuantes, respectivamente.

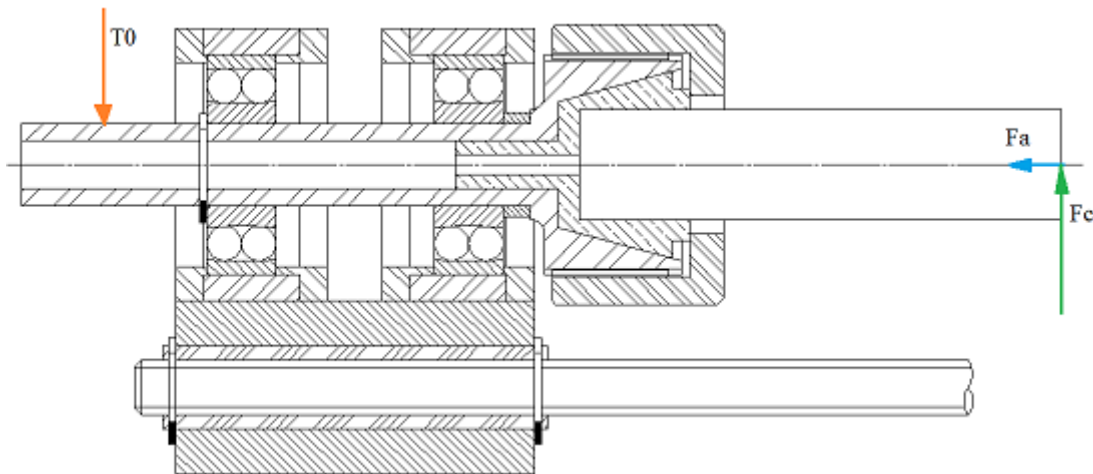


Figura 9: vista em corte do eixo e dos mancais (Fonte: acervo próprio).

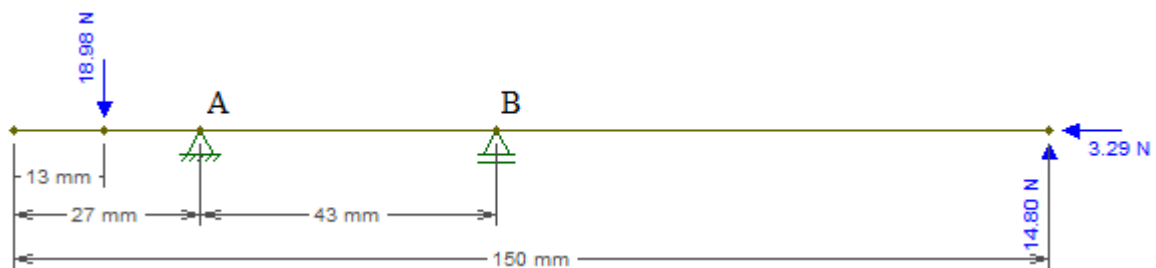


Figura 10: disposição das forças no eixo (Fonte:acervo próprio).

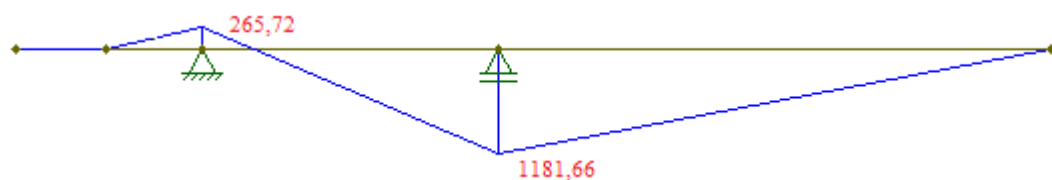


Figura 11: distribuição dos momentos fletores no eixo (Fonte: acervo próprio).

Pelos gráficos de momento fletor, o local mais solicitado é o mancal B. Portanto o dimensionamento do eixo foi feito para esse ponto. O material escolhido foi um aço 1020 e o critério utilizado foi o de “Energia máxima de distorção”. Para o material escolhido, a tensão de cisalhamento é igual a:

$$\tau_{adm} = 0,577 * 207 = 119,44 \text{ Mpa}$$

E o fator “a” para o cálculo do momento ideal é igual a:

$$a = \frac{\sigma_{adm}}{\tau_{adm}} = \frac{201}{119,44} = 1,73$$

Considerando uma relação entre “di” e “De” igual a 0,5, o fator “b” é igual a:

$$b = \frac{1}{1 - (0,5)^4} = 1,07$$

Com esses dados é possível calcular o momento ideal “Mi”:

$$Mi = \sqrt{1181,66^2 + \left(\frac{1,73}{2} * 161,60\right)^2} = 1189,9 \text{ N.mm}$$

Considerando o carregamento com tensão alternada, o coeficiente de segurança considerado é igual a 11,4. Portanto:

$$\sigma_{eadm} = \frac{207}{11,4} = 18,16 \text{ MPa}$$

Substituindo os dados na equação:

$$d \geq 2,17 * \sqrt[3]{\frac{1,07 * 1189,9}{18,16}} = 8,94 \text{ mm}$$

A verificação a fadiga foi feita calculando-se a tensão limite de fadiga corrigida pelos fatores de fadiga, como mostrado em Shigley (2005). O limite de fadiga foi calculado pela equação abaixo.

$$S_f = ka * kb * kc * kd * ke * kf * S'e$$

$$S_f = 0,93 * 1,08 * 1 * 1,010 * 0,897 * 1 * 191,02 = 173,82 \text{ MPa}$$

Portanto, o diâmetro do eixo-árvore considerando a fadiga deve ser de no mínimo:

$$d \geq 2,17 * \sqrt[3]{\frac{1,07 * 1189,9}{\left(\frac{173,82}{11,4}\right)}} = 9,48 \text{ mm}$$

Por questões construtivas, o eixo foi usinado com um De = 12,0 mm, que é um valor maior do que o necessário, mesmo quando considerando a fadiga.

O rolamento pré-selecionado foi o SKF 61801, que tem carga dinâmica básica “C” igual a 1,74kN. As reações nos mancais A e B são:

$$\mathbf{V_a = 54,64 N e H_a = 3,29 N}$$

$$\mathbf{V_b = 48,46 N}$$

Para uma vida útil estimada em 10000 h para ambos os mancais e considerando que os rolamentos são de esferas o número de revoluções nesse ciclo será igual à:

$$\mathbf{L_d = (10000) * rpm * \left(60 \frac{\text{mín}}{\text{h}}\right) = 600 * 10^6 \text{ revoluções}}$$

As cargas dinâmicas básicas nos rolamentos A e B foram calculadas para os mancais são respectivamente:

$$\mathbf{C_a = 460,85 N}$$

$$\mathbf{C_b = 408,73 N}$$

Como a carga dinâmica básica calculada para cada mancal é inferior ao que teoricamente é suportado pelo mancal, a escolha inicial de rolamento foi mantida.

Os fusos foram dimensionados considerando-os parafusos de potência através da equação mostrada abaixo.

$$\mathbf{T = \frac{F * dp}{2} * \frac{(\mu * \pi * dp + L * \cos\alpha)}{(\pi * dp * \cos\alpha - \mu * L)} \text{ (N. mm)}}$$

O fuso longitudinal precisa ser capaz de vencer a força de avanço, enquanto que o fuso transversal precisa superar a força de apoio. Os valores de torque de acionamento para ambos os casos foi de:

$$\mathbf{T = 6,38 N.mm, para o fuso longitudinal}$$

$$\mathbf{T = 3,77 N.mm, para o fuso transversal}$$

O motor que aciona o fuso transversal foi pré-selecionado e possui um torque de 0,5 N.m, que é mais do que suficiente e, portanto, pôde ser utilizado. Esse motor foi escolhido, entre outros aspectos como custo, porque possui um fuso com rosca ACME de 8mm embutido no lugar do eixo, diminuindo o número de peças que deveriam ser usinadas ou compradas. Já para o fuso transversal foi utilizado um motor de passo de pequenas dimensões, mas que possui uma caixa de redução com razão de 1:64, o que confere um bom torque para o motor.

3.2 Escolha dos programas e eletrônica

Para gerar o desenho no formato DXF optou-se por utilizar o *software* CAD que a universidade disponibiliza para os alunos. Dessa forma não há custos diretos para o projeto.

O software escolhido para gerar o código G a partir do desenho foi o GrblGRU, que possui uma interface gráfica muito interessante, simulando diversos tipos de máquinas ferramentas, além de ser gratuito e ser capaz de gerar os códigos de forma rápida.

Para enviar os comandos para a máquina e assim controlá-la foi escolhido o *software* Universal G-Code Sender, que é um *software* gratuito e compatível com o GRBL. Ele permite alterar os parâmetros do GRBL e controlar a máquina manualmente.

A escolha dos *drivers* dos motores de passo foi guiada pela corrente que eles conseguem suportar. Segundo informações disponibilizadas pelos fabricantes do motor, a corrente por fase é de 1,0 A para o motor do fuso longitudinal e 100 mA para o do fuso transversal. O *driver* utilizado foi o A4988, pois é de baixo custo, suporta correntes de até 2A por fase, e possui tensão de trabalho de 8V à 12V.

O motor principal utilizado possui uma potência de 64W, deve ter uma alimentação de 12V e pode consumir uma corrente de até 6,8A. Como ele é o elemento que mais consome eletricidade entre os componentes elétricos, a fonte foi escolhida com base nas suas necessidades. Foi utilizada uma fonte chaveada de 12V e 8,5A. A figura 12 mostra a montagem final do circuito.

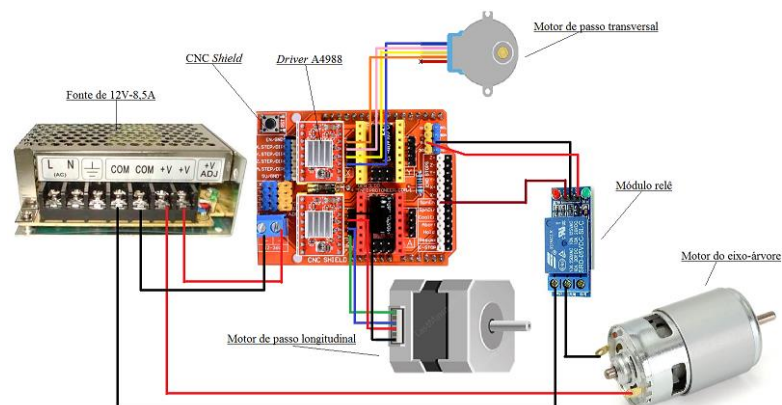


Figura 12: montagem do circuito de acionamento dos motores (Fonte: acervo próprio).

3.3 Usinagem dos componentes

Para fabricar os componentes do torno, foi utilizado aço 1020 disponível nos laboratórios de usinagem da universidade. Pensou-se primeiro em utilizar o alumínio, que é de usinagem mais fácil. A escolha do aço se dá devido a rigidez que ele provê à máquina, diminuindo a vibração resultantes das operações de usinagem

A maior dificuldade encontrada durante a fabricação das peças foi o tamanho delas. Algumas peças são muito pequenas e por isso necessitam de uma grande atenção nas medidas, pois qualquer variação pode significar que não haverá encaixe entre peças, ou que a folga será muito grande, o que seria prejudicial para a usinagem de alguma peça pela máquina. As figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, o eixo-árvore e a pinça sendo usinadas.



Figura 13: usinagem do eixo-árvore (Fonte: acervo próprio).



Figura 14: usinagem da pinça (Fonte: acervo próprio).

À medida que eram usinadas, as peças eram montadas para verificar possíveis interferências indesejadas ou folgas, de forma a fazer a correção em paralelo a fabricação. As figuras 15 e 16 mostram a montagem individual do cabeçote e do carro transversal e longitudinal.

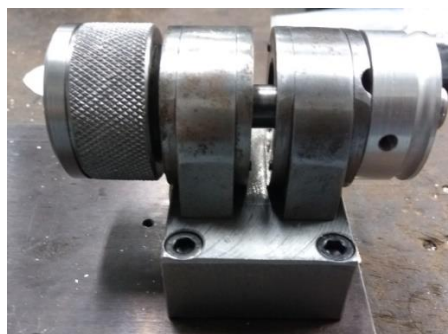


Figura 15: montagem do cabeçote fixo (Fonte: acervo próprio).

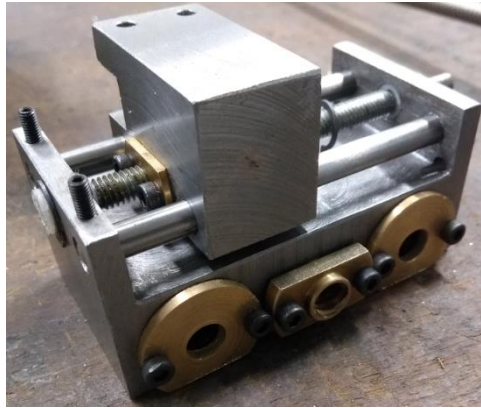


Figura 16: montagem dos carros transversal e longitudinal (Fonte: acervo próprio).

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com relação a usinagem dos componentes, o tempo total de usinagem foi maior do que o esperado. Foi estipulado pelos integrantes do grupo 1 mês para terminar todas as peças que compõe o torno. No final, o tempo total foi de dois meses.

Os *softwares* escolhidos atenderam às necessidades do projeto, e o conjunto Arduino-GRBL foi capaz de controlar corretamente os motores após a calibragem das velocidades de avanço dos motores de passo, sendo possível torneiar uma variedade de perfis como mostrado na figura 17. Nesse caso, o material para testes foi o Sibatum, que é um material mole e poroso. Foi utilizada uma pastilha de metal duro para realizar os testes.



Figura 17: perfis usinados durante os testes (Fonte: acervo próprio).

Também foram feitos alguns testes com alumínio e como a máquina foi dimensionada para trabalhar no máximo com esse material, percebeu-se que o motor principal trabalha no limite, esquentando bastante, mas não de forma a comprometer sua utilização. A figura 18 mostra o alumínio sendo usinado, enquanto que a figura 19 mostra a peça de alumínio e a de Sibatum que foram usinadas com o mesmo perfil.

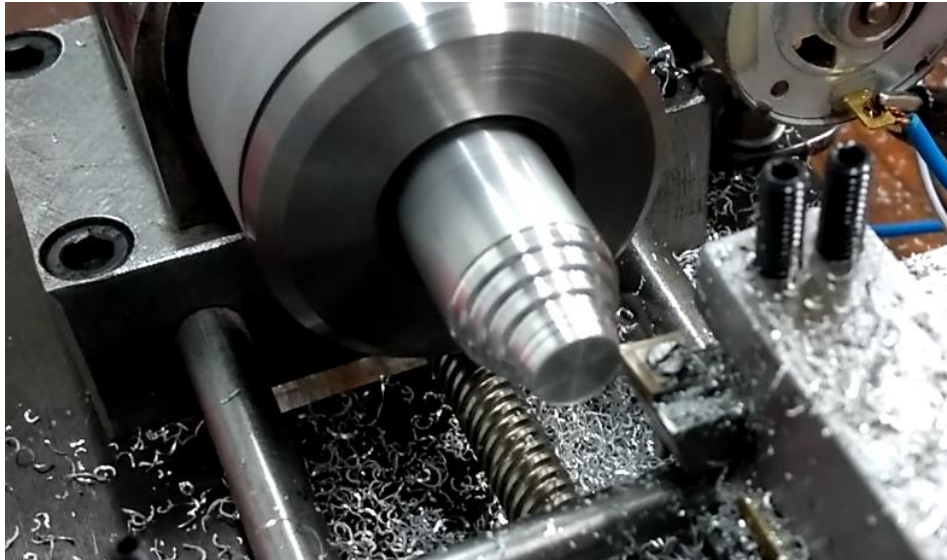


Figura 18: alumínio sendo usinado (Fonte: acervo próprio).



Figura 19: peça de alumínio e de Sibatum finalizadas (Fonte: acervo próprio).

Os motores dos fusos não tiveram problemas em movimentar os carros, mesmo durante o processo de usinagem. Foram feitos testes com e sem lubrificantes para os fusos e verificou-se que a falta de lubrificação não dificulta o movimento dos carros.

Como correia entre o motor principal e o eixo-árvore foi utilizado um *o'ring* num sistema de polias com redução de 1:4. Os resultados para esses testes foram satisfatórios, com o eixo-árvore sendo acionado sem dificuldades e a correia transmitindo o movimento sem deslizamentos.

O modelo final, mostrado na figura 20, não foi fabricado como o concebido inicialmente, devido a uma doação de peças ao projeto (a base e os mancais de rolamento). O projeto foi modificado para utiliza-las, mas isso não afetou o funcionamento e nem fez com que houvesse alguma mudança nos parâmetros e forças de usinagem, sendo apenas uma mudança na estética da máquina.

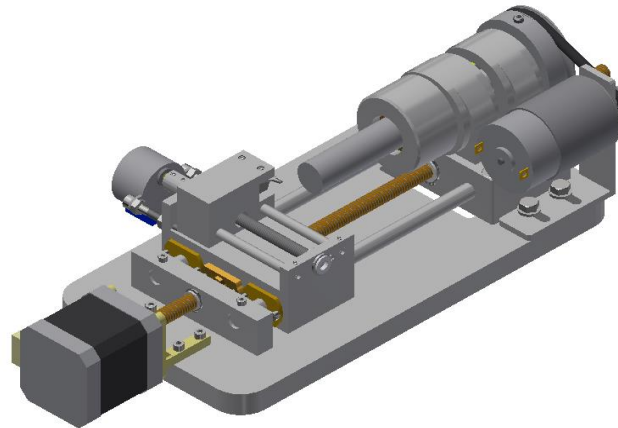


Figura 20: montagem do conjunto CAD (Fonte: acervo próprio).

A tabela 1 abaixo mostra uma lista de todas as peças que fazem parte da máquina, tanto partes mecânicas como elétrica, e a quantidade necessária de cada uma. Desse total, 26 peças foram fabricadas pelos alunos.

| Lista de peças | | | |
|-------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| Descrição | Quantidade | Descrição | Quantidade |
| Eixo árvore | 1 | Fuso longitudinal | 1 |
| Pinça | 1 | Porca do fuso longitudinal | 1 |
| Porca da pinça | 1 | Bucha do fuso longitudinal | 2 |
| Mancais de rolamento | 2 | Motor de passo longitudinal | 1 |
| Alojamento dos rolamentos | 2 | Apoio do motor de passo long | 1 |
| Apoio dos alojamentos | 1 | Motor de passo transversal | 1 |
| Polias | 2 | Motor do eixo árvore | 1 |
| Correia | 1 | Apoio do motor de passo long | 1 |
| Carro transversal | 1 | Ferramenta de corte | 1 |
| Castelo | 1 | Rolamentos lineares | 2 |
| Guias lineares transversais | 2 | Arduino | 1 |
| Fuso transversal | 1 | CNC Shield | 1 |
| Porca do fuso transversal | 1 | Driver A4988 | 2 |
| Acoplamento | 1 | Parafusos M3 | 17 |
| Buchas do fuso transversal | 2 | Parafusos M4 | 16 |
| Tampa dos rolamentos lineares | 2 | Parafusos M5 | 6 |
| Base | 1 | Arruela M5 | 2 |
| Guias lineares longitudinais | 2 | Anél elástico 10mm | 6 |
| Apoio das guias longitudinais | 1 | Anél elástico 12mm | 3 |
| Total | | | 92 |

Tabela 1: quantidade de peças da máquina.

2. O custo final da máquina ficou um pouco acima do objetivo desejado, como mostra a tabela

| Tabela de custo | | | |
|--|------------|----------------------|-------------------|
| Item | Quantidade | Valor unitário (R\$) | Valor total (R\$) |
| Motor de passo com fuso | 1 | 205 | 205 |
| Motor de passo 28BYJ-48 | 1 | 15 | 15 |
| Motor do eixo árvore | 1 | 38 | 38 |
| Rolamento linear | 2 | 12 | 24 |
| Rolamento 61802 | 2 | 35,8 | 71,6 |
| Arduino + cabo USB | 1 | 50 | 50 |
| CNC Shield V3.0 | 1 | 12,85 | 12,85 |
| Driver A4988 + dissipador de calor | 2 | 12,5 | 25 |
| Kit Cabo jumper MachoxFêmea 20cm - 20 un | 1 | 12,8 | 12,8 |
| Kit Cabo jumper FêmeaxFêmea 20cm - 20 un | 1 | 12,8 | 12,8 |
| Modulo Rele 1 saída 10A - 5v | 1 | 12,8 | 12,8 |
| Fonte 12V - 8,5A S-100-12 | 1 | 60 | 60 |
| Aço 1020 | 5 kg | 5 R\$/kg | 25 |
| Total | | | 564,85 |

Tabela 2: tabela de custo dos componentes da máquina.

5 CONCLUSÃO

O modelo final, apesar de não ser o mesmo que o proposto inicialmente, tem capacidade de funcionar da mesma forma, e a máquina atende aos requisitos de usinar um tarugo de 16 mm de diâmetro e 70 mm de comprimento com uma rotação de 1000 rpm.

Os motores de passo se mostraram muito eficientes durante os testes, respondendo bem aos comandos passados pelo *software* de controle. A combinação dos *softwares* de desenho, pós-processamento, e controle junto com o Arduino-GRBL mostrou-se funcional e prático e foi uma excelente solução para o projeto, principalmente por não gerar nenhum custo para ele.

O principal objetivo, de ser um projeto integrador, foi alcançado se mostra um excelente projeto para ser aplicado nos cursos de engenharia da UPM, pois envolve muitos conhecimentos multidisciplinares e necessita de uma cooperação muito bem coordenada por parte dos integrantes, de forma que o projeto tenha frentes andando em paralelo e interagindo umas com as outras para que se conclua a máquina.

Referências

ARDUINO. *What is Arduino?* Disponível em:

<<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 7 mar. 2017.

BANZI, Massimo. *Getting Started with Arduino*. 1. ed. O' Reilly, 2009

FERRARESI, Dino. *Usinagem dos metais*. São Paulo. Edgard Blucher, 1977.

MOTT, Robert L. *Elementos de máquinas em projetos mecânicos*. 5. Ed. São Paulo: Pearson.

ROSSI, Mario. *Maquinas Herramientas Modernas*. Milan: Ulrico Hoepli, 1981.

SHIGLEY, Joseph E; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. Projeto de elementos de máquina. 7. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer especialmente os técnicos dos laboratórios de usinagem da Universidade Presbiteriana Mackenzie, em especial os técnicos Edson Agostinho dos Santos, José Fernando e Flávio Augusto, que e dedicaram um pouco do seu tempo para nos ajudar a concluir esse projet

