

PROJETO E FABRICAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO, COM FOCO EM BAIXO CUSTO DE PRODUÇÃO E MANUTENÇÃO

DESIGN AND MANUFACTURE OF A COMPUTER NUMERICAL CONTROL MACHINE, FOCUSING ON LOW PRODUCTION AND MAINTENANCE COSTS

Lucas Henrique Cristino Calixto¹, Ivandro José de Freitas Rocha², Cleber Caetano Thomazi³

¹Academico de Engenharia Mecânica/FACEG ²Professor do Curso de Engenharia Mecânica /FACEG

³Orientador e Professor do Curso de Engenharia Mecânica /FACEG E-mail: cleber.thomazi@evangelicagoianesia.com.br

Resumo: O estudo contempla o projeto e a construção do protótipo de uma router CNC com três eixos independentes. São abordados diversos aspectos construtivos referentes à mecânica e à eletrônica, sempre utilizando critérios de engenharia para seleção dos componentes. A estrutura é constituída por materiais de fácil manipulação e que necessitam da menor interação possível do usuário, de forma a projetar uma máquina de fácil construção, baixo custo e que atenda a diversas necessidades. O protótipo desenvolvido atende com êxito os objetivos propostos, possuindo uma resolução satisfatória, velocidades de avanço superiores a 2500 mm/min e uma excelente área de trabalho para o preço. O sistema ainda oferece suporte a várias modificações e pode se adaptar a diferentes usos.

Palavras-chaves: Router CNC; Projeto de Máquinas; chapas de aço.

Abstract: The study includes the design and construction of a prototype of a CNC router with three independent axes. Several constructive aspects related to mechanics and electronics are approached, always using engineering criteria for the selection of components. The structure is made of materials that are easy to handle and that require the least possible user interaction, in order to design a machine that is easy to build, low cost and which meets different needs. The developed prototype successfully meets the proposed objectives, having a satisfactory resolution, feed rates above 2500 mm/min and an excellent working area for the price. The system still supports various modifications and can adapt to different uses.

Keywords: CNC router; Machine Design; steel plates.

INTRODUÇÃO

A acelerada progressão tecnológica possibilitou a usinagem de diversas matérias primas com uma produtividade crescente, o incremento de máquinas automatizadas e, mais recentemente, as Máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) permitiram uma grande flexibilidade nas linhas de manufatura. A sigla NC representa a automação das máquinas, em que um determinado programa retém todos os códigos para a fabricação e execução de uma peça¹.

Tais tecnologias de fabricação trazem consigo grandes benefícios, uma vez que amplificam a produtividade e qualidade geral das peças e facilitam a fabricação de peças complexas. Essas características têm forçado as empresas a substituírem suas máquinas ferramentas operadas de forma manual por máquinas automatizadas, para se manterem competitivas no mercado atual¹.

Esta busca por modernização tem sido observada nos últimos anos não unicamente em grandes indústrias, mas igualmente em setores menores, como os de prestação de serviços. Estudantes, artesões, joalheiros e pequenos empreendedores têm se aproveitado desta ciência para o fabrico dos mais variados objetos, como placas de circuitos

impresso, moldes para joias, fabricação de peças em madeira, dentre outras¹.

Dentre as opções mais usuais de operadoras CNC estão pequenas fresadoras e impressoras 3D. “Uma das principais características da fresadora é a realização de uma grande variedade de trabalhos tridimensionais. O corte pode ser realizado em superfícies situadas em planos paralelos, perpendiculares, ou formando ângulos diversos...”¹.

As fresadoras à disposição do mercado, porém, requerem um investimento inicial muito alto, manutenção rígida e especializada. Logo, inúmeros estudantes e hobbystas ao redor do globo se esforçam para desenvolver protótipos alternativos que visam transformar estas máquinas em um projeto simples, versátil e de qualidade, a fim de propiciar o seu uso para a execução das mais diversas atividades, favorecendo para que pessoas com pouca competência técnica possam replicar sem grandes dificuldades. O projeto da router CNC possui o princípio de jamais apresentar intuito lucrativo, e sua execução ser da forma DIY (Do It Yourself, faça você mesmo). Segundo Pearce², esta espécie de projeto inicia à idade das máquinas livres, de tal maneira que software e hardware sejam disponibilizados de forma gratuita.

Neste trabalho propõe-se a projetar, dimensionar, implementar e verificar uma fresadora CNC de pequeno porte que possa usinar materiais não ferrosos. A eletrônica deve ser facilmente encontrada no mercado nacional e o software de implantação livre. Este sistema deverá ser aplicável a uma máquina obtendo precisão, produtividade e um custo inferior aos sistemas existentes no mercado, de forma a atender a necessidade de pequenos negócios, e servindo como objeto de estudo para os acadêmicos de Engenharia Mecânica e ainda oferecer capacidade de expansão e suporte para novos projetos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura mecânica deve ser suficientemente rígida para receber os elementos de máquinas que proporcionem transmissão e conversão de energia mecânica, permitindo usinar materiais como madeira e polímeros. Deverá ser de fácil expansão e atender a diversas propostas de tamanho, além de requerer a mínima capacidade de intervenção do usuário, dando prioridade a componentes prontos que demandem apenas montagem ou conexão simples.

Com o objetivo em mente foi traçado um conjunto básico de requisitos os quais a máquina deverá atender: área de usinagem útil: 470 x 790 mm (podendo ser facilmente ajustada às necessidades do usuário); velocidade de avanço: ao menos 1000 mm/s; baixo custo (se comparado a máquinas semelhantes); baixo peso.

Inicialmente foram feitas várias análises em máquinas com propostas similares já existentes, o que possibilitou a concepção do projeto. O modelamento levou como base máquinas compartilhadas na comunidade OpenBuilds, um fórum de compartilhamento de projetos sobre máquinas de comando numérico computadorizado.

O software utilizado para o modelamento tridimensional, em ambiente virtual, de toda a estrutura foi o Autodesk Inventor®, devido a sua facilidade de obter componentes padronizados previamente modelados (parafusos, rolamentos, fusos, motores, etc.), além dos seus recursos para operação e alterações de projeto.

As peças foram modeladas individualmente. Em seguida foram montadas em subconjuntos, montagem eixo x, montagem lateral direita eixo y, montagem lateral esquerda eixo y, montagem base esquerda, até se obter a montagem final, conforme a Figura 1. A vantagem em se utilizar um sistema de modelamento 3D está na análise de interferências, o que faz com que o projeto possua uma alta probabilidade de sucesso. A partir da modelagem é possível obter uma pré-visualização da máquina (Figura 2), antes de iniciar o processo de fabricação.

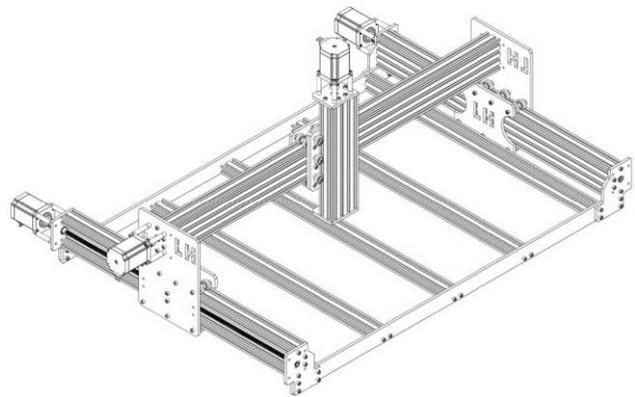


Figura 1. Vista do projeto, montagem final.

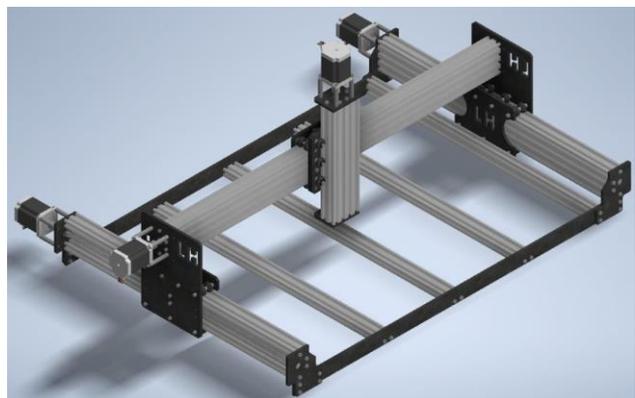


Figura 2. Pré-visualização renderizada da máquina.

A estrutura da máquina conta com duas dimensões de perfis, o C-Beam 80 x 40mm (Figura 3) que constituem os eixos de deslocamento e os perfis 40 x 20mm (Figura 4) que reforçam a base.

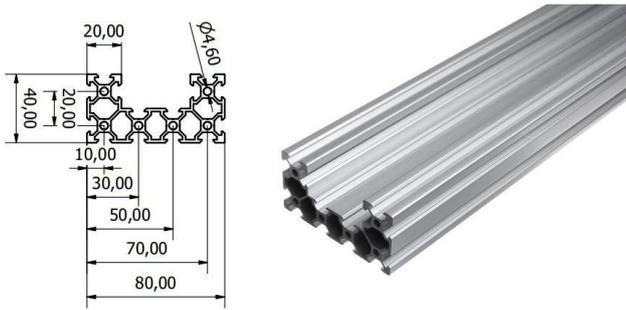


Figura 3. Perfil Alumínio Estrutural C-Beam 80x40mm

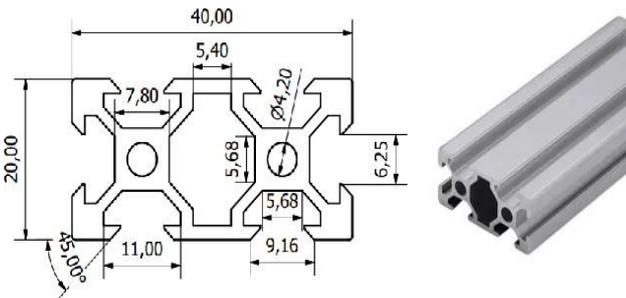


Figura 4. Perfil Alumínio Estrutural 40x40mm

O protótipo necessita de elementos que permitam a junção dos componentes aos perfis de alumínio estrutural. Para este propósito devido à disposição dos métodos e do material foram utilizados chapas de aço ASTM-A36 com 4,76 mm de espessura para a confecção das peças. No entanto, podem ser utilizados outros materiais para a confecção, tais como: chapas de alumínio, ACM (Aluminium Composite Material), PEAD (Polietileno de Alta Densidade), dentre outros. Cabe ao usuário a escolha do material mais acessível para a confecção dos cortes.

As peças mostradas na Figura 5 são as bases de fixação dos motores, eixos e rolamentos. São fixadas através de parafusos, conferindo estabilidade e suportando os movimentos e carga de trabalho do sistema.

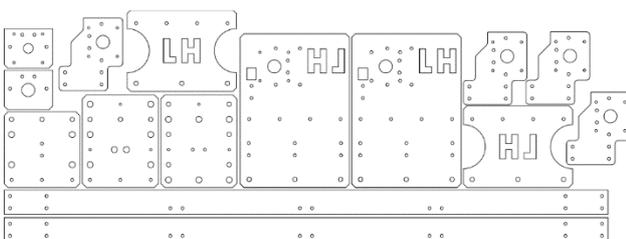


Figura 5. Peças de Junção da Estrutura.

O sistema de deslizamento de cada eixo é composto por um perfil de alumínio estrutural do tipo C-beam com dimensões de 80 x 40 mm, fixado à estrutura através de parafusos nas extremidades, conforme a Figura 6.

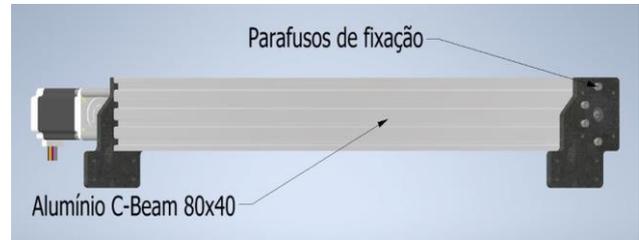


Figura 6. Fixação do perfil estrutural de alumínio a estrutura em aço

Sobre os perfis deslizam rolamentos revestidos com poliacetil de baixo atrito, projetados e executados para não haver folga, nem mesmo desalinhamento. Por garantia, a fim de se obter a interferência necessária, foram adicionados ao projeto porcas excêntricas que permitem a regulagem do contato entre perfil e roldanas. A disposição dos perfis e os sistemas de deslizamento podem ser vistos nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

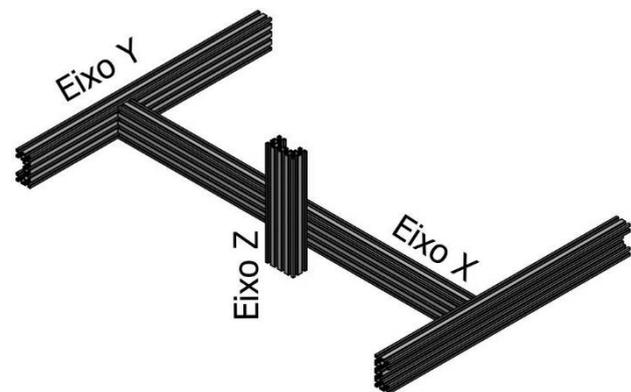


Figura 7. Disposição dos perfis estruturais ao longo dos eixos.

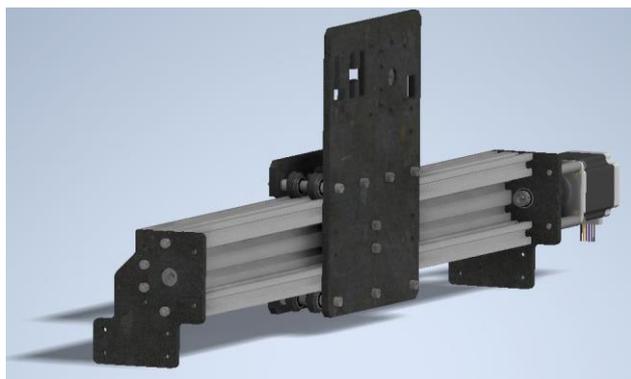


Figura 8. Sistema de deslizamento linear com roldanas.

O deslocamento é ocasionado pelo deslizamento das roldanas de poliacetal ao longo das cavidades do alumínio, que servem como trilhos, além de darem rigidez a estrutura. Dessa forma, é gerada economia na construção da máquina, já que um único componente possui duas funções.

O sistema de trilhos linear com perfis de alumínio é bem difundido na comunidade de construção de máquinas CNC. Facilmente encontram-se os rolamentos já montados disponíveis para a compra, o que é mais viável do que comprar os rolamentos separados e toronar o revestimento de POM.

A escolha de se utilizar fuso trapezoidal é facilmente justificada por suas boas características, aliadas ao seu baixo custo se comparado com fusos de esfera. O modelo selecionado para o projeto possui 8 mm de diâmetro externo, passo de 2 mm e 4 entradas, o que resulta em um avanço de 8 mm por revolução. Propriedades que garantem à máquina uma boa precisão, velocidade de deslocamento e eficiência na transmissão de torque, visto que aliado a uma castanha de poliacetal é possível obter rendimentos próximos aos 50 %.

Foi definida uma força de usinagem que seria a responsável pelos esforços solicitantes na estrutura. Foram utilizados alguns parâmetros base, como: material a ser usinado, velocidade de avanço, penetração de trabalho, dentre outros.

Com o intuito de deixar as simulações mais fáceis e requisitar menos processamento, a estrutura foi

subdividida e analisada de forma fracionada: eixo Z, eixo X e eixo Y.

O Autodesk Inventor® possui uma biblioteca própria para análise de estresse mecânico e para utilizá-la bastou associar materiais e as suas devidas propriedades mecânicas ao desenho 3D e delimitar as faces fixas que não possuem deslocamento, gerando logo em seguida a malha para simulações.

A estrutura é basicamente formada pela junção de liga de alumínio 6063 T5 e aço ASTM-A36, A Figura 9 apresenta o coeficiente de segurança para o eixo Z, seguida pela Tensão de von Mises (Figura 10) e pelo deslocamento (Figura 11).

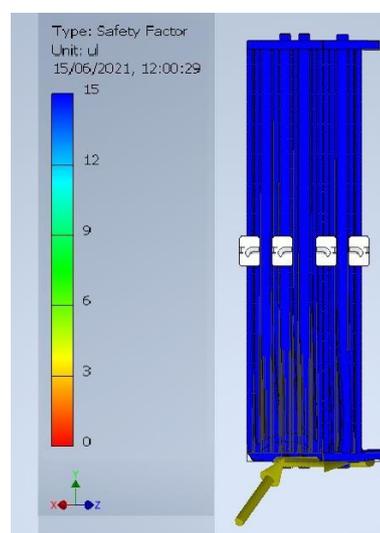


Figura 9. Coeficiente de segurança eixo Z.

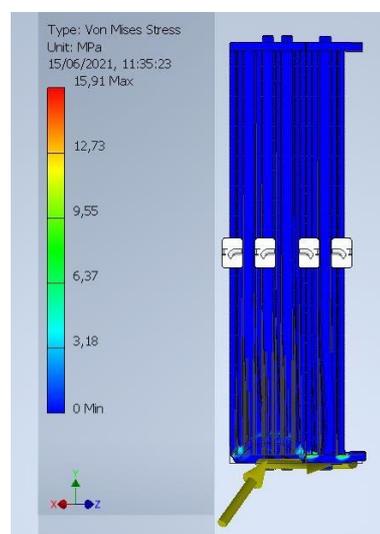


Figura 10. Tensão de von Mises eixo Z.

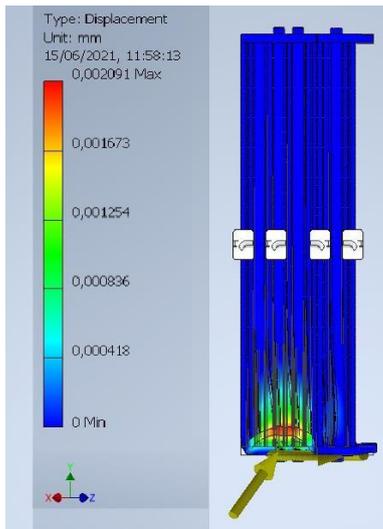


Figura 11. Deslocamento eixo Z.

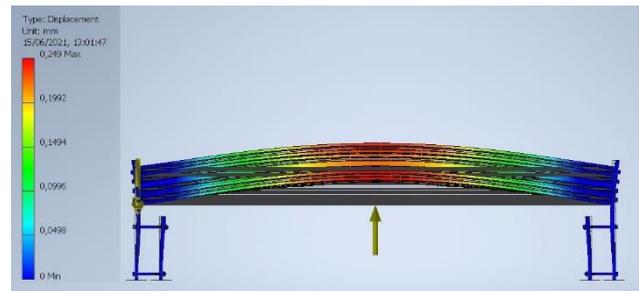


Figura 14. Deslocamento eixo X.

As Figuras 12, 13 e 14 apresentam o coeficiente de segurança para o eixo X, a Tensão de von Mises e o deslocamento, respectivamente.

Como esperado os valores mais significativos foram encontrados no eixo Y. Este eixo é o responsável por receber todo o restante do sistema. Contudo, as cargas usadas para simulação são superiores as reais e ainda assim os valores encontrados não são significativos e tampouco despertam preocupação. As Figuras 15, 16 e 17 expõem os valores encontrados para o coeficiente de segurança, a Tensão de von Mises e o deslocamento, respectivamente.

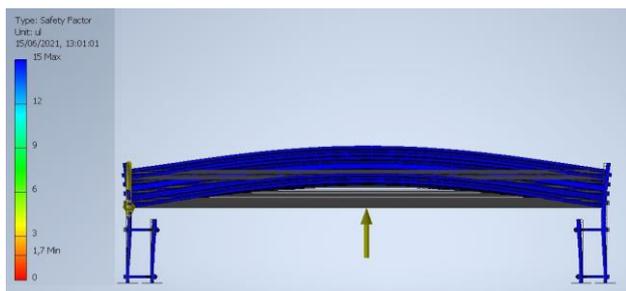


Figura 12. Coeficiente de segurança eixo X.

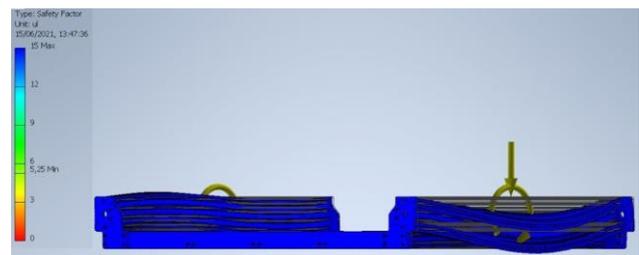


Figura 15. Coeficiente de segurança eixo Y.

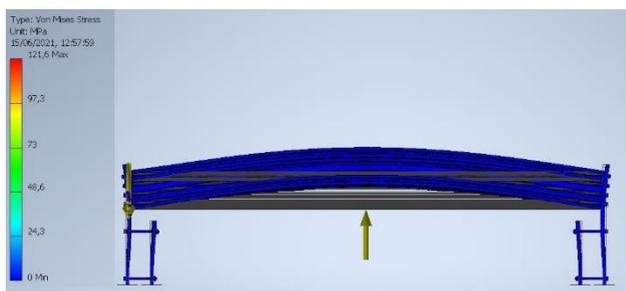


Figura 13. Tensão de von Mises eixo X.

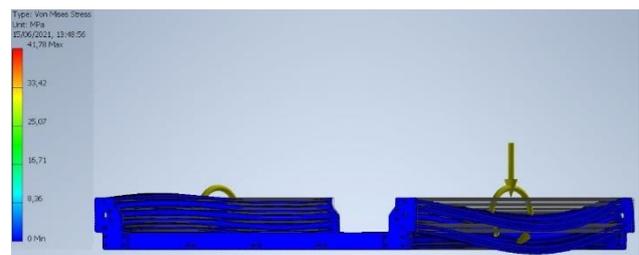


Figura 16. Tensão de von Mises eixo Y.



Figura 17. Deslocamento eixo Y.

O sistema eletrônico de uma máquina CNC pode ser seccionado em módulos: placa controladora, drivers de potência, motores de passo, fonte de energia, dentre outros.

Responsável por processar os dados enviados pelo computador, coordenando os movimentos executados pela máquina, tais como: direção, sentido e módulo de deslocamento. Recebe comandos externos através de abotoadores, como parada, pausa e retorno ao trabalho.

Como relatado anteriormente, o Grbl foi desenvolvido para funcionar em microcontroladores Atmega328. O Arduino Uno é uma das placas que possuem este microcontrolador e ainda possui uma ampla comunidade de suporte, além de oferecer placas de circuito que podem ser facilmente acopladas e que facilitam em muito a montagem.

A placa possui quatorze portas digitais de entrada e saída, das quais seis possuem PWM (Pulse Width Modulation) e conta, ainda, com seis entradas analógicas e 32kB de memória. A configuração de qual porta recebe determinada função é pré-configurada pelo Grbl. Sendo muito complicada edição do firmware e reconfiguração das portas.

Os fios podem ser ligados diretamente aos drivers e botões através do Arduino, no entanto esta ligação facilita a aparição de mal contatos e erros. Para promover maior facilidade na montagem e menor probabilidade de falhas optou-se por utilizar um Shield, o qual não passa de uma placa que é facilmente acoplada em cima do Arduino e que expande as suas capacidades e facilita as conexões.

A CNC SHIELD V3 (Figura 18) permite que o acoplamento de até quatro drivers de potência, chaves fins de curso, e botões para pausa e parada. Há uma conexão destinada ao circuito de alimentação, contudo não será utilizada no projeto, visto que a alimentação será feita diretamente aos drivers de potência.

Drivers de potência são necessários quando as especificações de alimentação de um dispositivo são maiores do que as do sistema que o controla. Trabalham ampliando sinais elétricos de baixa potência em sua entrada em pulsos elétricos de maior potência em sua saída. São

necessários para o funcionamento dos motores de passo e foram escolhidos para o projeto o modelo DM542.

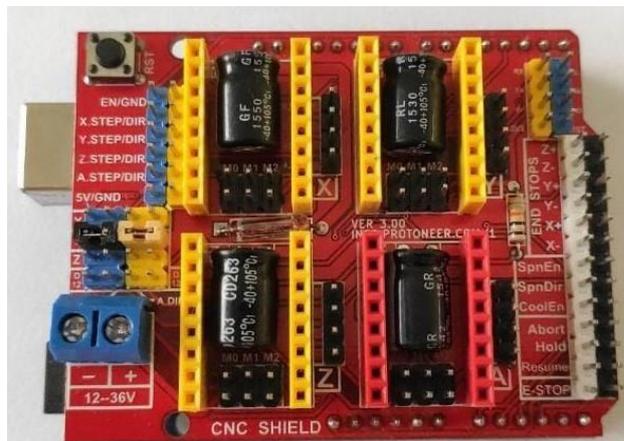


Figura 18. CNC SHIELD V3.

Motores de passo do tipo híbrido mostraram-se os mais apropriados para a aplicação em uma máquina de comando numérico computadorizado. Fazer o dimensionamento dos motores é essencial para o bom funcionamento da máquina e para explorar totalmente o seu potencial. Com o objetivo de facilitar nos cálculos foi desenvolvida uma tabela (Tabela 1) para dimensionamento dos motores acoplados em fusos trapezoidais.

Para a sua utilização, é necessário a inserção de alguns parâmetros, dentre eles: parâmetros de usinagem como profundidade de corte e avanço, características do fuso e propriedades do material que se pretende usar. Chegou-se à conclusão que para os dados inseridos era necessário um motor de passo que possuísse ao menos 1,61 N.m de torque à uma rotação de 312,5 rpm.

Em posse dos dados foi escolhido o modelo J-5718HB5401 da empresa SHANGHAI ZHENGJI. De posse dos motores de passo é possível acertar os switches do driver de potência para a corrente necessária e os micro passos desejados.

A fonte de alimentação é o mecanismo utilizado para suprir toda a demanda energética necessária para o pleno funcionamento do projeto. É necessário fazer um levantamento de todas as tensões e correntes para fazer a escolha dos componentes.

MEMORIAL DE CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DE MOTOR DE PASSO E USINAGEM

DADOS DE ENTRADA		RESULTADOS CALCULADOS	
Forças Envolvidas no Sistema		Inércia da Carga e Mesa	
Massa total das cargas e da mesa (Kg)	20	Inércia da Mesa (Kg.m ²)	3,24228E-05
Coefficiente de Força Específica de Corte (MPa)	31,4	Inércia do Fuso (Kg.m ²)	3,23066E-06
Largura de Corte (mm)	6	Inércia Total (Kg.m ²)	3,56534E-05
Espessura de Corte (mm)	3		
Especificação do Fuso Trapezoidal e da Castanha		Requisitos do Motor	
Diâmetro (mm)	8	Força Necessária para Movimentar o Sistema (N)	761,4
Comprimento Total (mm)	1030	Torque Requerido pelo Sistema (N.m)	1,61045487
Passo do fuso (mm)	2	Velocidade Requerida do Motor pelo Sistema (RPM)	312,5
Avanço do Fuso (mm)	8		
Diâmetro primitivo (mm)	6,700962	Dados Extraídos do Catálogo do Motor	
Coefficiente de Atrito da Rosca (%)	32%	Torque Disponível no Eixo para a Velocidade Requerida (N.m)	2,74
Densidade do Material (Kg/m ³)	7800	Inércia do Rotor do Motor de Passo (Kg.m ²)	0,00003
Fator de Serviço de Torque almejado	1	Passos do Motor/Giro	200
		Passos Intermediários	4
Parâmetros de Usinagem		Crítérios de Projeto	
Potência do Spindle (kw)	0,8	Relação de Inércia do Sistema	1,188448062 APROVADO
Coefficiente de Eficiência do Spindle (%)	60%	Fator de Serviço de Torque	1,701382666 APROVADO
Velocidade de avanço desejada (mm/min)	2500	Resolução de Parada (mm)	0,01
		Potência de corte Requerida (Kw)	0,03925 APROVADO

Informe nas janelas em azuis os valores pedidos para fazer o dimensionamento dos motores de passo e verificar a potência do spindle.

Tabela 1. Dimensionamento de motores de passo

Há três entradas para fontes de alimentação: Fonte 24 V: nível de tensão para o funcionamento do da refrigeração e para as bobinas do motor; Fonte Spindle: fonte com tensão de saída variável para alimentação do spindle; Fonte 5 V: Fonte para alimentação do Arduino e do Raspberry Pi.

A fonte de 24 V é a única que requer um dimensionamento, já que as demais vieram junto com os dispositivos e possuem os requisitos necessários. Para o funcionamento de apenas 1 motor são requeridos 4,2 A, logo para o funcionamento do conjunto são necessários 16,8 A e 200 mA para o funcionamento do cooler. Por questão de segurança e de forma a garantir a corrente necessária, foi estabelecida uma margem de segurança de 20 %, então, foi considerada uma corrente mínima de 20 A. Foi adotada uma fonte chaveada de 24 V com capacidade de 20 A, totalizando 480 W de potência.

Com a modelagem 3D foi possível estabelecer todos os parâmetros e componentes da máquina. Desta forma, tornou-se fácil a construção e a montagem do protótipo, pois o usuário passa a contar com um manual completo e em escala real do projeto e pode, por ele, se orientar.

Para a confecção das peças planas foram utilizadas diversas ferramentas. A marcação dos furos e recortes exteriores foram realizados com a ajuda de uma máquina CNC plasma oferecida gratuitamente pela empresa GSV Montagem Industrial sediada em Goianésia-GO.

Após todo o processo de adequação das peças e do processo de fabricação foi realizada uma montagem com o intuito de verificar se havia alguma inconsistência no projeto. A primeira disposição dos elementos pode ser vista na Figura 19.

Com a parte mecânica finalizada foi possível dar início à montagem eletrônica e fabricação do chicote, desta forma foram unidos os fios dos motores ao chicote com o auxílio de ferro de solda e estanho, e posteriormente foram isolados com o uso de tubo termo retrátil.

Após soldar todos os conectores mikes nos fios e assegurar que o comprimento está correto para o pleno funcionamento da máquina, o chicote se encontra finalizado.

Existem formas de fazer o nivelamento da mesa por software, contudo é necessário refazê-la regularmente e demanda muito tempo, de forma a ser viável apenas para

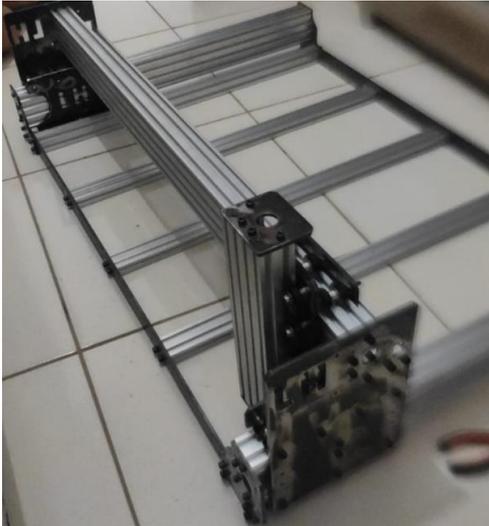


Figura 19. Primeira montagem da Máquina.

pequenas áreas de trabalho. Portanto, o ideal a se fazer é utilizar a própria máquina para realizar o aplainamento. Foi utilizada uma fresa de 12 mm com avanço de 1500 mm/min e um passe lateral de 40%, com uma rotação estimada de 20000 rpm para aplainar a mesa, e parte do processo está representado na Figura 20.



Figura 20. Aplainamento da mesa.

Após finalizado o processo de aplainamento foi realizada a verificação utilizando um arquivo de desenho, e o resultado pode ser notado na Figura 21. O resultado foi bastante satisfatório e a máquina se mostrou pronta para fazer a fixação das buchas americanas na tábua de sacrifício. Os furos e o rebaixo foram feitos pela própria CNC.



Figura 21. Desenho após o aplainamento.

Foram realizados um total de 56 furos com 8mm de diâmetro e 15 mm de profundidade e 56 rebaiços de 1mm com 12mm de diâmetro. O resultado atendeu às necessidades e as buchas puderam ser fixadas conforme a Figura 22.



Figura 22. Tábua de sacrifício com buchas americanas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a validação do projeto, verificação de estabilidade, acurácia e precisão, submeteu-se a máquina a alguns testes de usinagens em MDF. As peças usinadas serviram para analisar o desempenho da máquina ao desenvolver vários percursos retos, curvos e arredondados e verificar o esquadro da estrutura. A Figura 54 apresenta a usinagem de algumas geometrias que foram utilizadas como parâmetros de teste.



Figura 23. Usinagem de corpos de teste.

Obteve-se durante a usinagem erros inferiores a 2 décimos de milímetro. A Figura 24 mostra a verificação com paquímetro de um quadrado com dimensão projetada de 60 mm. Um relatório de controle dimensional de todas as geometrias usinadas pode ser analisado mais à frente na seção de anexos.



Figura 24. Controle dimensional quadrado 60x60mm.

A velocidade de avanço máxima testada para usinagem foi de 3000 mm/min. Contudo a velocidade pode ser aumentada além deste valor, pois os motores de passo não perderam a sincronia de acionamento e não houve perda de passos e referência. Em testes de movimentação livre obteve-se valores próximo aos 5000 mm/min e se não houvesse pouco espaço para aceleração seriam possíveis velocidades ainda maiores.

O projeto requer pouca interação do usuário com ferramentas e a confecção de componentes é mínima, dando preferência a produtos de fácil acesso no mercado e com custos relativamente baixos. Os softwares utilizados para operação da máquina são todos de licença gratuita e multiplataforma, facilitando o acesso e permitindo que o usuário faça as suas próprias adaptações, não havendo a necessidade de seguir todo o projeto à risca.

A máquina desenvolvida está longe de ser uma opção acessível a todas as pessoas, todavia seu custo ainda é inferior aos custos de máquinas com precisão equivalentes disponíveis no mercado, reforçando que o projeto se mostra uma opção economicamente viável. Pode-se observar na Tabela 2 os custos de alguns modelos e suas características comparadas ao projeto.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos resultados obtidos o autor considera que o projeto desenvolvido atende com êxito e satisfação todos os objetivos propostos, possuindo uma resolução satisfatória, velocidades de avanço superiores a 2500 mm/min e uma excelente área de trabalho para o preço. O sistema ainda oferece suporte a várias modificações e pode se adaptar a diferentes usos.

Máquina	Especificações	Valor (R\$)
Desenvolvida	Área útil: 790 mm (x), 470 mm (y), 100 mm (z). Motores de passo: Nema 23 de 3,1 N/m Incluso <i>Spindle</i> de 800 W e Computador	7.000,00
Rc0505	Área útil: 500 mm (x), 500 mm (y), 60 mm (z). Motores de passo: Nema 23 não especificado otorque Incluso somente micro retífica	10.300,00
Hobby 755	Área útil: 565 mm (x), 765 mm (y), 80 mm (z). Motores de passo: Nema 23 de 1,9 N/m Incluso <i>Spindle</i> de 500 W	10.850,00

Tabela 2. Comparação de preços entre máquinas CNC equivalentes.

Como ressalva, o autor reconhece a necessidade de projetar um sistema aspirador de partículas, pois durante a usinagem de MDF é gerado pó em quantidade excessiva e se torna prejudicial tanto para máquina, quanto para o operador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **SCHAPLA, A et al.** Fresadora. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2010. Disponível em: Acesso em: 16 de nov. de 2020.
2. **PEARCE, J. M.** Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware. Science Magazine, v. 337, n. 6100, p. 1303–1304, 2012.