
DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA FRESADORA CNC MULTIFUNÇÃO DE BAIXO CUSTO

Bruno Alves de Godoy Cavenaghi

Caio Alves de Godoy Cavenaghi

Jose Fernando Paz Gonzalez

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

A proposta deste trabalho constitui em modelar, simular e construir uma alternativa de menor tamanho e mais barata às máquinas CNC disponíveis no mercado, que seja suficientemente rígida para usinar metais como alumínio e latão e com aplicação em corte de chapas e usinagem de pequenas peças tridimensionais. Para tanto, o objetivo é mostrar o desenvolvimento e a construção de uma máquina fresadora CNC multifunção (fresamento, gravação em madeira, corte a *laser* e gravação a *laser*), a fim de se obter um equipamento de baixo custo e de operação simples. A metodologia do projeto se baseia na revisão bibliográfica acerca do processo de fresamento e pesquisa sobre máquinas comerciais. Posteriormente, procedeu-se à concepção do equipamento e à seleção dos componentes. Por fim, após a fase de construção, a máquina foi submetida a testes, por meio dos quais foi possível avaliar sua funcionalidade e seu desempenho. O desenvolvimento da máquina alcançou todas as finalidades desejadas, como a movimentação em três eixos e o cabeçote intercambiável, sendo um equipamento bastante robusto (deformação máxima de 0,3166 mm), que se mostrou funcional, de operação simples e com custo total cerca de 50% abaixo da máquina mais barata contemplada na pesquisa de mercado.

Palavras-chave: CNC. Fresamento. Usinagem.

1 INTRODUÇÃO

A máquina proposta possui uma base estática, onde se fixa a matéria-prima a ser trabalhada, e o cabeçote, fixado em braços móveis, traçando uma rota em três dimensões e removendo o material excedente, de acordo com o programado para produzir a peça. Por se tratar de uma máquina destinada a pequenos empreendedores, marceneiros e entusiastas, ela acaba sendo menos rígida que uma fresadora convencional. A fresadora em estudo tem o intuito de trabalhar com materiais de menor dureza, como plásticos, madeiras e certos metais, como alumínio e latão, o que permite uma área útil maior e tolerâncias mais amplas para aplicação em corte de chapas e pequenas peças tridimensionais.

Quando se contemplam no projeto materiais e componentes já existentes no mercado, reduz-se o custo de fabricação sem comprometer a integridade e o desempenho do equipamento, surgindo então uma solução para aqueles que almejam uma fresadora CNC ou uma máquina multifunção, custeando apenas os materiais adquiridos.

A justificativa para a máquina multifunção consiste na melhor utilização do potencial de uma máquina CNC, que desloca a ferramenta de acordo com um programa e contempla a remoção do material. Assim, a máquina ganha versatilidade com a rápida troca do cabeçote, o que gera uma redução significativa de custos e de espaço ocupado, não sendo necessárias máquinas individuais para cada processo.

O presente trabalho traz um repertório teórico suficiente para a compreensão do funcionamento e melhor seleção dos principais componentes de uma máquina CNC capaz de efetuar operações de fresamento em metal e corte a *laser* em chapas de madeira. Neste trabalho, apresenta-se a metodologia de projeto adotada baseado na bibliografia e desenvolve-se um protótipo-solução em linha com as premissas estabelecidas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, contempla-se o embasamento teórico do funcionamento das máquinas CNC e de seus sistemas operacionais, do processo de fresamento e corte a *laser*, com os esforços envolvidos e sobre os elementos individuais que compõem a estrutura de uma máquina fresadora.

2.1 Máquinas CNC

As máquinas CNC diferem de uma máquina manual no acionamento de seus eixos. Segundo Fitzpatrick (2015), o movimento do eixo CNC acontece de forma automatizada através de sinais enviados do controlador, que é responsável em converter comandos de programas em comandos de acionamento e enviá-los até os motores de acionamento, que realizam a translação mecânica dos eixos. Cada eixo possui um relé de acionamento, e isso permite que o controlador acione qualquer motor individualmente, recebendo os sinais do comando de controle e interpretando-os para a necessidade de cada motor. Os motores de acionamento de uma máquina CNC precisam ser altamente controláveis e previsíveis para garantir uma alta precisão e reprodutibilidade.

2.1.1 CAD

O desenho auxiliado por computador (*computer aided design* – CAD) se refere ao *software* especificamente criado para ajudar a esboçar e visualizar conceitos de *design* 2D ou 3D a partir de desenhos, modelos e renderizações, para então simular a funcionalidade do mundo real e exportar dados CAD para o *software* de manufatura auxiliada por computador (*computer aided manufacturing* – CAM) (ENGLE, 2021).

2.1.2 CAM

O *software* CAM utiliza os modelos criados no *software* CAD para gerar caminhos de ferramentas que guiam as máquinas CNC, para converter os projetos virtuais em peças físicas. Alguns *softwares* CAM ainda integram um ambiente de simulação da usinagem, no qual se podem configurar o modelo de fixação, as dimensões da máquina e a geometria da ferramenta (DEANS, 2021). Uma das vantagens de simular as peças antes da usinagem é que se podem prever e corrigir possíveis colisões durante a operação. Recomenda-se sempre realizar uma simulação antes de enviar para a máquina CNC (FERNANDO, 2018). A Figura 1 mostra o ambiente de simulação da trajetória da ferramenta em um *software* CAM.

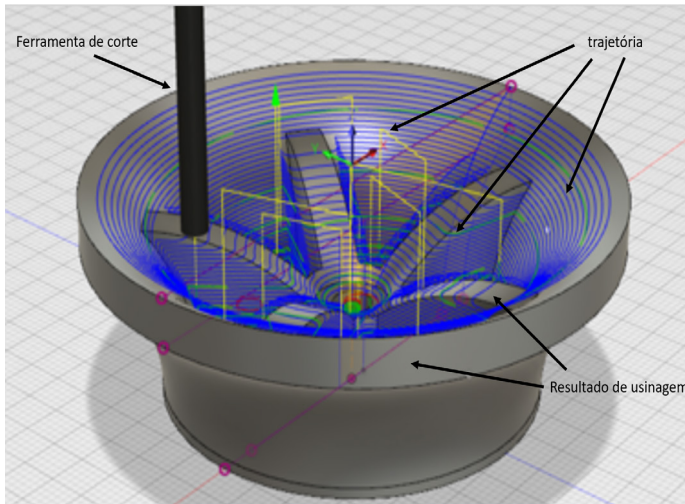


Figura 1 Ambiente de simulação da trajetória em um software CAM

Fonte: Adaptada de Deans (2021).

Uma vez verificados e ajustados todos os parâmetros para a produção da peça, o *software* CAM converte todas essas informações para a linguagem da máquina CNC, o código G (DEANS, 2021).

2.1.3 Código G

O código G é uma linguagem de programação utilizada nas máquinas CNC que emprega letras e números para indicar as operações e o posicionamento da máquina durante seu funcionamento. Essa linguagem faz uso de um conjunto de códigos e comandos normalizados, compilados de uma forma compacta e concisa, composto normalmente por uma letra seguida de um número (DEANS, 2018).

A lógica de programação em código G consiste em detalhar comandos para a máquina CNC processar e transformar em movimento por meio de um servomecanismo (FITZPATRICK, 2015). Com o código G pronto, o programa é enviado para a máquina CNC realizar o processo de usinagem.

2.2 Usinagem

A usinagem se refere a todos os processos de fabricação em que ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG

E.V., 2003). Seus principais processos são de furação, de torneamento e de fresamento, e, dessa forma, são fabricados diferentes formatos de peças. As operações de usinagem também podem ser referidas como processos complementares aos de estampagem, extrusão, fundição, entre outros, e assim se chega às tolerâncias requeridas.

No processo de fresamento, a ferramenta gira enquanto a mesa (onde se prende a peça) é responsável pelos movimentos de avanço longitudinal e transversal. Em alguns casos, a mesa pode ficar estática, enquanto a ferramenta de corte realiza todos os movimentos (MACHADO *et al.*, 2015).

2.3 Corte a laser

Laser é uma forma de radiação não ionizante concentrada que provoca aquecimento, fusão e evaporação quando entra em contato com diferentes materiais, cortando-os quando há deslocamento do feixe de luz (LIMA, 2018).

Na área da usinagem, a principal utilização do *laser* é no corte de materiais. Os principais parâmetros a serem ajustados para obter os resultados procurados são: a velocidade de corte, a potência do *laser* e o ajuste de ponto focal (HITZ; EWING; HECHT, 2012). Para que haja o corte, o feixe de luz desloca-se com uma certa velocidade de modo que permanece no ponto de corte o tempo suficiente para fundir e vaporizar o material, transformando-o em fuligem e, na sequência, deslocando-se para o próximo ponto.

Para Lima (2018), o ajuste focal é de extrema importância para a qualidade do corte. No *laser*, o feixe de luz na saída é mais disperso, com diâmetro focal maior, e é gradativamente concentrado de acordo com a lente utilizada até um pequeno diâmetro (Figura 2). A irradiância (potência por unidade de área) atinge seu valor máximo no menor diâmetro focal. Para um melhor ajuste na máquina, deve-se manter o menor tamanho do foco em contato com a peça, permitindo um corte mais rápido e com maior qualidade de acabamento.

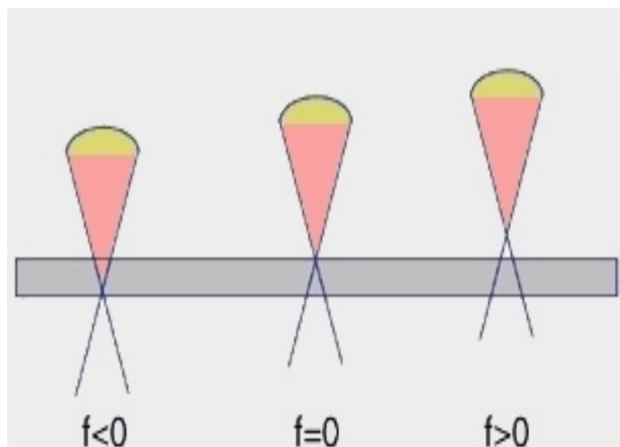


Figura 2 Ajuste focal

Fonte: Idacontrol (2018).

2.4 Componentes mecânicos

Nesta seção, serão estudados os componentes mecânicos de uma máquina fresadora CNC de bancada, a fim de compreender os elementos responsáveis por sua estrutura, bem como pelo movimento dos eixos. É essencial que cada componente seja devidamente estudado e selecionado, pois qualquer desalinhamento terá um impacto direto no desempenho e na eficiência de todo o conjunto.

2.4.1 Estrutura

A estrutura de uma máquina corresponde a uma base onde são fixados todos os seus componentes de trabalho. De acordo com Mayer (2020), é imprescindível que a estrutura atenda aos requisitos de rigidez, estabilidade térmica, facilidade de manipulação, acessibilidade aos componentes internos da máquina e custo contemplados no projeto.

Os formatos de estrutura de fresadoras CNC destacam-se pela forma como os componentes se deslocam nos eixos de trabalho. A estrutura de pórtico é bastante empregada quando se necessita atingir uma área de trabalho elevada em relação à área da máquina (SOUZA; ULBRICH, 2013). Nesse caso, atribui-se a movimentação dos eixos X, Y e Z ao cabeçote da máquina, fixado a uma estrutura suspensa, tipo pórtico, mantendo a mesa de trabalho estática.

2.4.2 Fuso trapezoidal

Um fuso trapezoidal é essencialmente uma barra cilíndrica rosqueada. Baseado no mesmo princípio de funcionamento de um parafuso sendo rosqueado numa porca, é o elemento responsável pela transformação do movimento rotacional do motor de acionamento para o movimento de translação linear da mesa (LYRA, 2010).

2.4.3 Movimentação linear

Segundo Santos (2013), os fusos não devem ser submetidos a esforços radiais, mas somente axiais. Portanto, será necessário outro componente que suporte os esforços de apoio e ao mesmo tempo permita uma movimentação linear satisfatória, com o mínimo de atrito e o máximo de precisão, como eixos retificados de aço com rolamentos lineares.

2.5 Componentes eletrônicos

Nesta seção, serão estudados os componentes eletrônicos de uma máquina fresadora CNC de bancada, a fim de compreender os elementos responsáveis por seu controle e sua calibragem. Para que todos os sistemas funcionem de forma automática e precisa, é essencial que cada elemento de acionamento e controle seja devidamente estudado e selecionado.

2.5.1 Motor de passo

Um motor de passo é um dispositivo eletromecânico que transforma pulsos de energia elétrica em pequenos movimentos, chamados de incrementos ou passos (RIBEIRO, 2013). Esses motores são usualmente empregados em aplicações de medição e controle, pois a posição do eixo é conhecida a todo momento sem a necessidade de um mecanismo de realimentação, e o motor consegue manter o eixo estacionário desde que seu torque máximo seja respeitado. Esse tipo de motor também é ideal para máquinas com controle numérico CNC, pois oferece uma excelente resposta à partida, parada e reversão de movimento.

2.5.2 Placa controladora e driver de acionamento

A placa controladora é o componente que recebe os sinais vindos do computador e a tensão proveniente da fonte de alimentação e os distribui aos demais dispositivos conectados. A grande característica da placa controladora é a facilidade com que ela se

comunica com o *software* CAM, permitindo um contato direto entre o computador e a máquina CNC (POLICOMP, 2017).

O *driver* de acionamento é um circuito eletrônico responsável por receber e amplificar os pulsos da placa controladora e enviá-los ao motor de passo para acionar as bobinas de forma controlada (NEOMOTION, 2021). Assim como a placa controladora, cada *driver* possui uma faixa de tensão para seu funcionamento e precisa ser selecionado de acordo com a potência do motor de passo empregado, possibilitando o controle de velocidade e posicionamento do motor.

Contudo, para conectar os *drivers* de acionamento à placa controladora, é necessário utilizar uma peça de adaptação chamada de *CNC Shield*. Esses componentes (placa, *driver* e *shield*) são comumente encontrados em *kits* (Figura 3) para uso em pequenas máquinas CNC.



Figura 3 Kit Arduino CNC

Fonte: Casa da Robótica (2019).

3 MATERIAS E MÉTODOS

A metodologia empregada no trabalho foi baseada no fluxograma apresentado por Oliveira (2019), ilustrado pela Figura 4. Seguindo essa ideia, o desenvolvimento do

projeto foi dividido em oito passos, sendo alguns passos iterativos que devem ser realizados até a obtenção dos resultados satisfatórios.

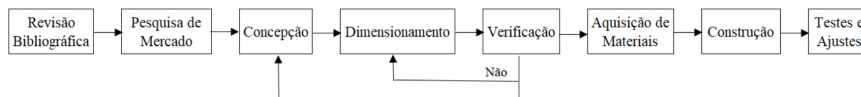


Figura 4 Etapas de desenvolvimento de projeto

Fonte: Oliveira (2019).

3.1 Pesquisa de mercado

A pesquisa de mercado tem como objetivo a busca e seleção de máquinas similares em tamanho e funcionalidade ao projeto proposto, para assim ter uma base de comparação em relação ao custo e às especificações das máquinas disponíveis atualmente no mercado.

TABELA 1

Pesquisa de mercado

Modelo	Área útil	Potência fresadora	Precisão	Repetibilidade	Preço
4040-XE	400 x 400 x 65 mm	300 W	0,1 mm	NE	R\$ 7.300,00
Stepcraft D420	300 x 420 x 140 mm	1000 W	0,04 mm	+/- 0,04 mm	R\$ 13.400,00
Shapeoko Pro	840 x 840 x 102 mm	710 W	NE	NE	R\$ 13.800,00
X-Carve	750 x 750 x 115 mm	930 W	0,075 mm	NE	R\$ 12.300,00
Blue Elephant 6090	600 x 900 x 150 mm	1500 W	0,05 mm	+/- 0,01 mm	R\$ 21.200,00

NE - não especificado.

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.2 Concepção do projeto

A concepção da fresadora CNC multifunção é mostrada na Figura 5, por meio de um desenho em perspectiva. Tendo como base a revisão bibliográfica, foi estipulado o

uso do alumínio como material estrutural da máquina por sua versatilidade, alta resistência mecânica e acessibilidade. A estrutura móvel (apoiada no eixo Y) consiste em chapas de alumínio de 8 mm de espessura. A mesa, feita de perfil estrutural de alumínio, contém ranhuras para fixar a madeira de sacrifício e as peças a serem trabalhadas. A caixa de madeira utilizada para apoio do protótipo tem como objetivos: portabilidade (podendo ser colocada em cima de qualquer bancada), redução de vibrações que são transmitidas pelos motores e armazenagem de ferramentas menores e de todos os componentes eletrônicos da máquina.

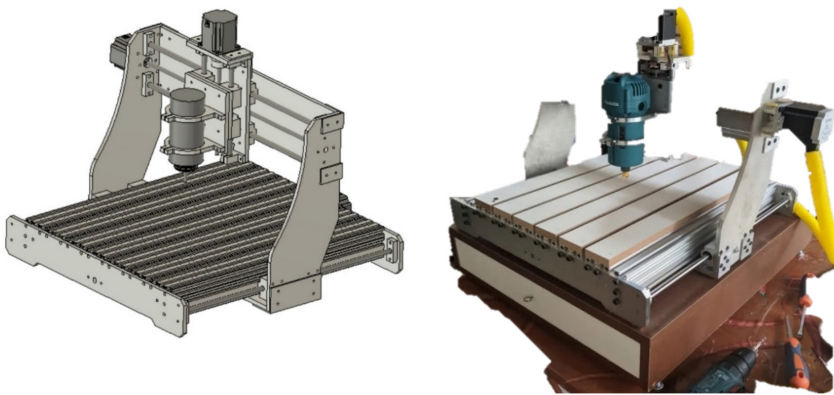


Figura 5 Vista em perspectiva do projeto: conceito e protótipo

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.3 Dimensionamento

3.3.1 Parâmetros de fresamento

Para se quantificar o processo de fresamento, deve-se analisar a interação entre a ferramenta de corte e o material a ser trabalhado. Esses parâmetros incluem velocidade de corte, avanço da mesa, força de corte e potência de corte (MITSUBISHI, 2018).

A velocidade de corte (Fórmula 1) se refere à velocidade tangencial da fresa, podendo ser fixa ou variável, conforme a variação da rotação do eixo principal, como apresentada por Mitsubishi (2018).

$$v_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (1)$$

Em que:

v_c = velocidade de corte [m/min];

d = diâmetro da ferramenta [m];

n = rotação do eixo árvore [rpm].

O avanço se refere à velocidade de deslocamento da mesa em relação à peça. Quando é o cabeçote que se movimenta, o avanço se refere à taxa de deslocamento dele (Fórmula 2).

$$v_f = f_z * z * n \quad (2)$$

Em que:

v_f = avanço da mesa [mm/min];

f_z = avanço por dente [mm];

z = número de dentes da ferramenta;

n = rotação do eixo árvore [rpm].

Segundo Machado *et al.* (2015), o conhecimento da força de usinagem que age sobre a cunha de corte (Fórmula 3) é de grande utilidade, pois assim pode-se estimar a potência necessária para se obter o corte, bem como todas as forças atuantes no conjunto máquina-ferramenta, importantes para dimensionar a estrutura da máquina.

$$F_c = k_s * A \quad (3)$$

Em que:

F_c = força de corte [N];

k_s = pressão específica de corte [N/mm²];

A = área da seção de corte [mm²].

A área da seção de corte pode ser encontrada a partir da Fórmula 4.

$$A = a_p * f_z * \sin \varphi \quad (4)$$

Em que:

A = área da seção de corte [mm²];

a_p = profundidade de corte [mm];

f_z = avanço por dente [mm].

Para o fresamento, a pressão específica de corte é dada pela Fórmula 5.

$$k_s = k_{s1} * h_m^{-z} \quad (5)$$

Em que:

$k_{s1} = [N/mm^2]$ e z são fornecidos por Machado *et al.* (2015) para diversos materiais;

$h_m = [mm]$ é a espessura média do cavaco, calculada a partir da Fórmula 6.

$$h_m = \frac{\sin \alpha * 180 * a_e * f_z}{\pi * d * \arcsen\left(\frac{a_e}{d}\right)} \quad (6)$$

Em que:

h_m = espessura do cavaco [mm];

a_e = largura de usinagem [mm];

f_z = avanço por dente [mm];

d = diâmetro da ferramenta [mm].

Para determinar alguns parâmetros que serão utilizados, podem-se considerar os seguintes: diâmetro da ferramenta = 6 mm; rotação do eixo árvore = 30.000 rpm; avanço da mesa máximo = 2.200 mm/min; número de dentes = 1; profundidade de corte = 1 mm; $K_{s1} = 700 N/mm^2$ para alumínio; $z = 0,25$.

Segundo Ferraresi (1970), para fresas cilíndricas tangenciais, pode-se fazer a seguinte simplificação para se obter a força de avanço (Fórmula 7):

$$F_f = \frac{F_c}{4,5} \quad (7)$$

Em que:

F_f = força de avanço [N];

F_c = força de corte [N].

Quando se conhecem todas essas grandezas, calculam-se a força de corte e a força de avanço, e, então, pode-se dimensionar a estrutura da máquina para suportar esses esforços. É possível calcular também a potência de corte e a potência de avanço, conforme as fórmulas 8 e 9, respectivamente (MACHADO *et al.*, 2015).

$$P_c = \frac{F_c * v_c}{6,0 * 10^4} \quad (8)$$

Em que:

P_c = potência de corte [kW];

F_c = força de corte [N];

v_c = velocidade de corte [m/min].

$$P_f = \frac{F_f * v_f}{6,0 * 10^7} \quad (9)$$

Em que:

P_f = potência de avanço [kW];

F_f = força de avanço [N];

v_f = velocidade de avanço [mm/min].

A potência do motor de acionamento (Fórmula 10) é dada pela relação entre a potência encontrada e a eficiência dos sistemas de transmissão entre os motores e os sistemas finais.

$$P_m = \frac{P}{\eta} \quad (10)$$

Em que:

P_m = potência do motor [kW];

P = potência de corte ou potência de avanço [kW];

η = eficiência do sistema de transmissão do eixo-árvore ou sistema de avanço.

“Para sistemas de transmissão com engrenagens ou correias, pode-se adotar $\eta = 0,65$ a $0,85$; e para sistemas com motor acoplado, $\eta = 0,80$ a $0,85$ ” (MACHADO *et al.*, 2015, p. 128). Assim, para determinar a potência final do motor, sendo este acoplado diretamente no eixo, considera-se um rendimento conservador de $\eta = 0,80$.

No caso desse dimensionamento para a fresadora, obtiveram-se os seguintes resultados: força de corte = 40 N; força de avanço = 9 N; potência de corte = 380 W; potência de avanço = 3,3 W; potência do motor de corte = 480 W; potência do motor de avanço = 4,1 W.

3.3.2 Potência do laser

Segundo Lima (2018), para se dimensionar o *laser*, o cálculo do balanço de energia e a inclusão da energia não produtiva dissipada no material são necessários. São exemplos: energia perdida por condução, energia para elevar a temperatura da peça à temperatura de evaporação e energia para mudança de fase.

A potência total requerida é calculada pela Fórmula 11, conforme Bachmann, Poprawe e Loosen (2007).

$$P_c = P_{tp} + P_m + P_v + P_l \quad (11)$$

Em que:

P_c = potência total [W];

P_{tp} = potência para chegar à temperatura de processo [W];

P_m = potência para fundir o volume de cavaco [W];

P_v = potência para evaporar o volume de cavaco [W];

P_l = potência para compensar as perdas de calor por condução [W].

Como o corte de MDF se dá por vaporização, elimina-se da equação a parcela necessária para fundir o material (P_m), e, como a vaporização da madeira é atingida com maior facilidade que outros materiais, a parcela P_v pode ser desprezada, de acordo com Lima (2018), com a parcela de perda por condução (P_l), por ser ínfima. Assim, para determinar a potência do *laser*, basta o cálculo da energia necessária para aquecer o volume de material a ser removido até sua temperatura de vaporização, conforme a Fórmula 12, segundo Bachmann, Poprawe e Loosen (2007).

$$P_{tp} = b_m * s * v_c * \rho * c[(1 - \delta_p)(T_p - T_0) + \delta_v(T_s - T_0)] \quad (12)$$

Em que:

b_m = diâmetro focal [m];

s = espessura do material [m];

v_c = velocidade de corte [m];

ρ = densidade do material [kg/m³];

c = calor específico do material [J/kgC];

δ_v = parcela do *kerf* vaporizada [%];

T_p = temperatura de carbonização do material [°C];

T_0 = temperatura ambiente [°C];

T_s = temperatura da superfície do material [°C].

A potência calculada para o módulo *laser* poder realizar cortes em chapas de MDF de até 6 mm de espessura é de aproximadamente 15 W, considerando-se uma margem de segurança. Entretanto, não foi adquirido esse módulo por restrições no orçamento, e utilizou-se um módulo *laser* de 1 W apenas para o teste de multifuncionalidade da máquina.

3.3.3 Dimensionamento dos eixos lineares

Para dimensionamento dos eixos lineares de apoio, foi estimada a carga máxima de 12 kg no eixo Y, por se tratar do eixo que sofre maiores esforços.

Por meio de cálculos de elementos de máquinas, chegou-se a um diâmetro mínimo necessário de 5,2 mm. Optou-se por usar um diâmetro de 12 mm para os eixos, pois esse tamanho é o mais comum no mercado para esse tipo de aplicação e proporciona um alto coeficiente de segurança.

3.3.4 Dimensionamento do fuso trapezoidal

Para dimensionamento do fuso trapezoidal, foi estimada a carga máxima que precisaria ser levantada pelo fuso, nesse caso, no eixo Z, de aproximadamente 5 kg.

Foi verificado se um fuso TR45 com passo de 8 mm, tamanho mais comum no mercado, suportaria essa condição por meio do cálculo de carga dinâmica dado pela Fórmula 13 (A.T.I. BRASIL, 2021).

$$Q_{din} = A_{sf} \cdot P_{AMM} \cdot 3 \quad (13)$$

Em que:

Q_{din} = carga dinâmica [N];

A_{sf} = área de contato da rosca [mm²];

P_{AMM} = pressão admissível na superfície de contacto da rosca [N/mm²].

A carga dinâmica calculada que o fuso TR45 suporta é de até 258 N, aproximadamente 26 kg, consideravelmente maior que os 5 kg necessários.

3.3.5 Dimensionamento do motor de passo

Para o dimensionamento e a seleção dos motores de passo, o ponto de partida foi a potência de avanço calculada (Fórmula 9). Considerando uma força de avanço de 9 N para uma velocidade de avanço máxima definida no projeto de 2.200 mm/min, calculou-se então que a potência máxima de avanço da máquina é de aproximadamente 5 W.

Conforme demonstra a curva de torque do motor (Figura 6), o fator crítico para a seleção do motor de passo não se deve ao cálculo da potência, mas sim ao torque necessário a uma certa rotação, pois essa curva decai rapidamente com o aumento da velocidade. Assim, considerando que o fuso tem um passo de 8 mm, a velocidade angular é de $\omega = 36,6$ rad/s ou 350 rpm para o avanço estipulado.

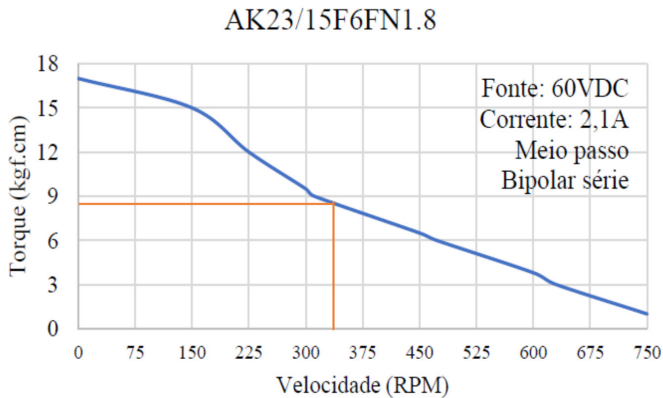


Figura 6 Curva de torque motor de passo

Fonte: Neomotion (2021).

Para se obter o resultado do torque causado pelo atrito, foram realizados testes práticos utilizando uma balança de mão para puxar a estrutura móvel da máquina apoiada nos eixos, chegando ao valor de $T_{atr} = 0,5$ Nm, podendo variar de acordo com a força de avanço. Assim, o somatório dos torques é dado pela Fórmula 14 (NEOMOTION, 2021):

$$T = \frac{P}{\omega} = T_{mot} - T_{atr} \quad (14)$$

Em que:

P = potência do motor [W];

ω = velocidade angular [rad/s];

T_{mot} = torque do motor [kgf.cm];

T_{atr} = torque causado pelo atrito [kgf.cm].

$$T_{mot} = 0,6 Nm = 6 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (15)$$

Para que a máquina se movimente corretamente, é necessário que o motor forneça um torque igual ou superior ao calculado (Fórmula 15). O motor escolhido possui um torque de trabalho de aproximadamente 8 kgf.cm na velocidade de funcionamento da máquina, uma folga considerável para os 6 kgf.cm necessários.

3.3.6 Resolução do movimento linear

A resolução do movimento linear está relacionada com a revolução do motor e o passo do fuso. Para obter a resolução final do conjunto, foi utilizada a Fórmula 16 (OLIVEIRA, 2019).

$$S = \frac{D \times R}{P} \quad (16)$$

Em que:

S = número de passos que o motor deverá dar para mover o conjunto por 1 mm;

D = divisão do passo configurada no *driver*;

R = resolução do motor de passo [passos por revolução];

P = passo do fuso trapezoidal [mm].

Os motores escolhidos possuem resolução de 1,8° por passo ou 200 passos para uma revolução. O fuso trapezoidal adquirido tem passo de 8 mm, a configuração feita no *driver* de acionamento foi de dois passos por passo real do motor, assim o número de passos por milímetro calculado é de 50 passos/mm, e isso resulta em uma resolução de 0,02 mm.

3.4 Verificação

Para avaliar as deformações, utilizou-se uma ferramenta do *software* Fusion 360, de modo que foi possível realizar um estudo estático por elementos finitos. Cabe ressaltar que a utilização dessa ferramenta foi apenas para se ter uma noção global de como o sistema ira se comportar com a aplicação de uma carga normal de utilização de 30 N, simulando a força de corte no alumínio, bem como o peso próprio da estrutura.

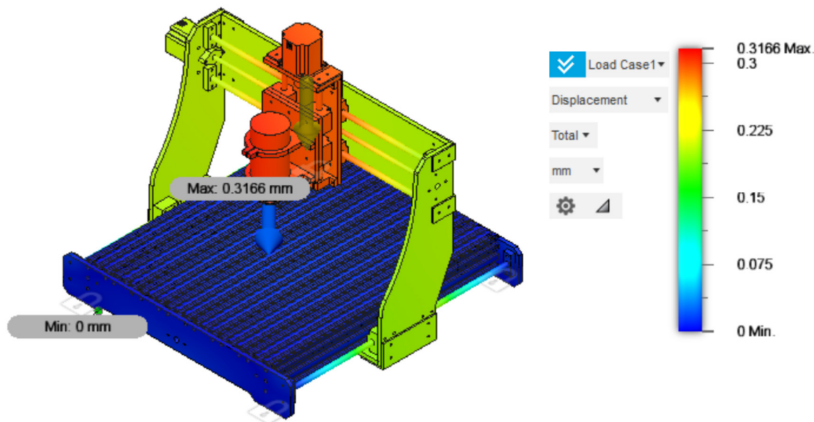


Figura 7 Simulação de elementos finitos

Fonte: Elaborada pelos autores.

A estrutura apresentou na simulação uma deformação máxima de 0,3166 mm quando se aplicou a força vetorial na ponta da ferramenta de corte em uma direção diagonal entre os eixos X e Y, conforme ilustrado na Figura 7, demonstrando ser um equipamento que possui uma boa rigidez para a utilização sugerida de uso caseiro.

3.5 Seleção e aquisição

Uma vez definidos todos os componentes que seriam usados no protótipo, os materiais foram pesquisados em catálogos de fabricantes, *sites* e lojas especializadas, para assim escolher os mais adequados e com os melhores preços.

TABELA 2

Lista de componentes

Descrição	Quantidade	Preço/un.
Cantoneira de alumínio 50 x 50 x 500 mm	1	R\$ 45,00
Cantoneira interna alumínio 20 mm	4	R\$ 3,50
Cantoneira interna alumínio 40 mm	2	R\$ 3,00
Chapa de alumínio 560 x 780 x 8 mm	1	R\$ 526,20
Chave fim de curso	6	R\$ 5,83
Conjunto Arduino, CNC <i>Shield</i> e <i>drivers</i>	1	R\$ 105,77
Conjunto Eixo linear 200 mm	1	R\$ 118,30
Conjunto Eixo linear 500 mm	2	R\$ 165,47
Conjunto Fuso trapezoidal 200 mm	1	R\$ 78,62
Conjunto Fuso trapezoidal 500 mm	2	R\$ 117,85
Fonte de alimentação de 24 V e 20 A	1	R\$ 119,99
Mancais de apoio vertical	2	R\$ 33,71
Motor de passo Nema 23	3	R\$ 170,47
Perfil Alumínio Estrutural 20 x 40 x 500 mm	2	R\$ 27,78
Perfil Alumínio Estrutural 20 x 60 x 500 mm	7	R\$ 37,93
Porca antifolga para fuso trapezoidal	3	R\$ 8,44
Porcas, parafusos e arruelas	1	R\$ 177,50
Serviço de usinagem CNC terceirizado	1	R\$ 500,00
Total tarifas e fretes	-	R\$ 419,81
TOTAL	-	R\$ 3.638,03

Fonte: Elaborada pelos autores.

A máquina de corte escolhida foi uma Tupia de 530 W da marca Makita, de posse anterior ao projeto e, portanto, não consta no orçamento.

O *software* Fusion 360 da Autodesk foi utilizado como *software* CAD para a criação das peças a serem usinadas bem como *software* CAM para gerar o caminho da ferramenta e o código g. O *software* de código aberto, Universal G-code Sender (Figura 8), foi escolhido para enviar o código g e formar a interface com o controlador da máquina.

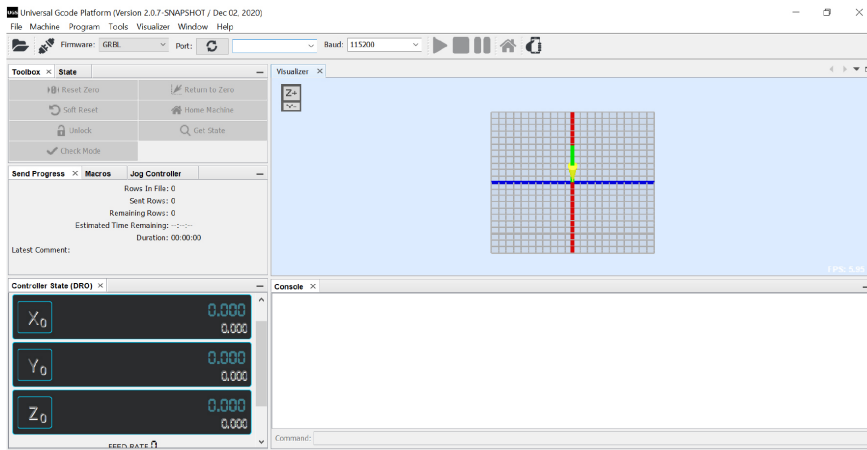


Figura 8 Interface do software Universal G-code Sender

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.6 Construção do conjunto

Uma vez adquiridos todos os componentes, foi necessário contratar um serviço de corte CNC terceirizado para a usinagem das peças em alumínio a partir de uma única chapa, e isso proporcionou economia de tempo e precisão no corte das peças, o que de outra maneira seria inviável. A partir de então, a montagem tornou-se mais fácil e rápida, pois utilizou-se somente ferramental leve disponível, o que demandou cerca de 50 horas para sua conclusão.

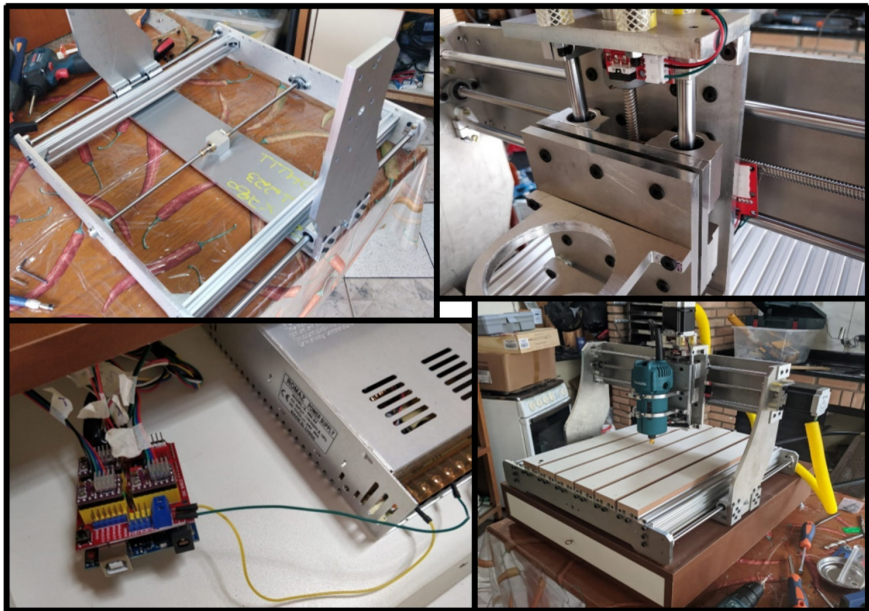


Figura 9 Detalhe do eixo Y (superior esquerda); detalhe do eixo X e Z (superior direita); detalhe dos componentes eletrônicos (inferior esquerda); máquina finalizada (inferior direita)

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.7 Testes

O primeiro teste elaborado foi para determinar a exatidão e repetibilidade individual nos eixos X, Y e Z. Consistiu em cinco cortes idênticos de 50 mm de comprimento, com a largura da ferramenta de 5 mm de profundidade em cada uma das cinco velocidades de avanço selecionadas. Utilizou-se um paquímetro como instrumento para medir os 50 cortes avaliados (Figura 10). Os cortes foram realizados com a ferramenta de 6 mm em uma série de passes até a obtenção da profundidade de corte programada.

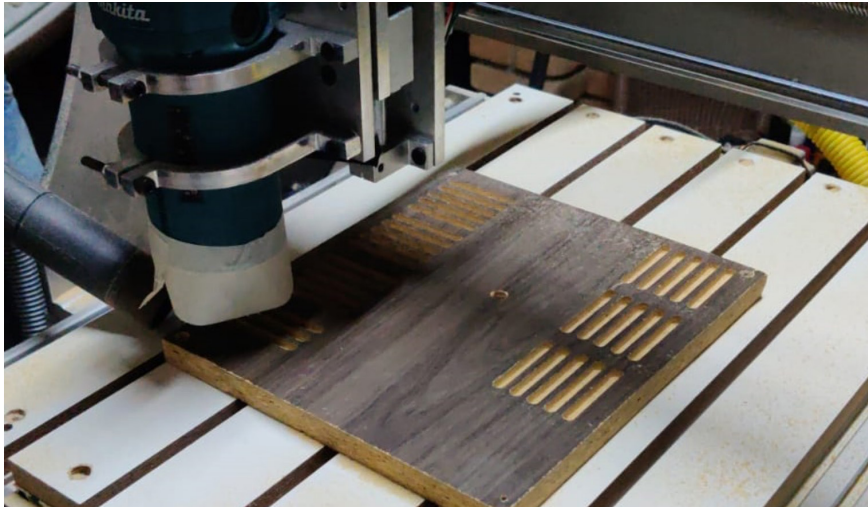


Figura 10 Realização do teste de usinagem

Fonte: Elaborada pelos autores.

O segundo teste validou a multifuncionalidade da máquina a partir da troca de cabeçote. A Figura 11 ilustra o cabeçote com um módulo *laser* e um pirógrafo.

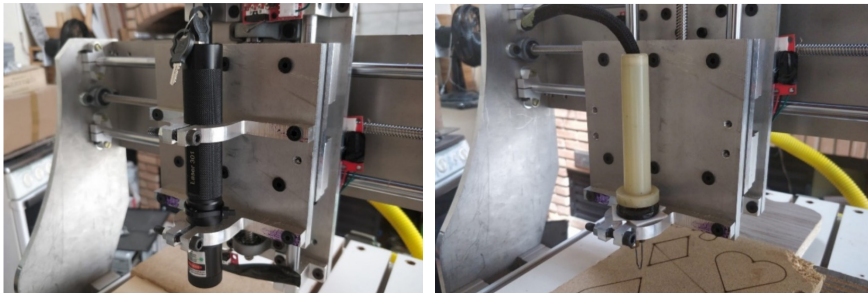


Figura 11 Módulo *laser* (esquerda) e pirógrafo (direita)

Fonte: Elaborada pelos autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos no primeiro teste.

TABELA 3

Resultados do teste de precisão e repetibilidade

Velocidade	Eixo	Corte realizado (mm)					Média	Desvio padrão	Erro
500 (mm/min)	X	49,95	50,00	50,10	50,05	50,00	50,02	0,0570	0,04%
	Y	49,45	49,45	49,50	49,40	49,45	49,45	0,0354	1,10%
	Z	4,70	4,80	4,90	5,00	4,75	4,83	0,1204	3,40%
750 (mm/min)	X	50,05	50,00	49,90	50,05	49,95	49,99	0,0652	0,02%
	Y	49,55	49,55	49,50	49,45	49,50	49,51	0,0418	0,98%
	Z	5,00	5,10	5,40	5,30	5,20	5,20	0,1581	4,00%
1.000 (mm/min)	X	49,90	50,00	50,05	50,05	49,95	49,99	0,0652	0,02%
	Y	49,40	49,45	49,40	49,50	49,45	49,44	0,0418	1,12%
	Z	5,30	5,30	5,40	5,40	5,50	5,38	0,0837	7,60%
1.250 (mm/min)	X	50,10	49,95	50,05	49,95	50,05	50,02	0,0671	0,04%
	Y	49,40	49,50	49,30	49,25	49,25	49,34	0,1084	1,32%
	Z	5,20	5,30	5,40	5,50	5,70	5,42	0,1924	6,60%
1.500 (mm/min)	X	50,10	49,95	50,15	49,95	50,05	50,04	0,0894	0,08%
	Y	49,25	49,20	49,35	49,30	49,30	49,28	0,0570	1,44%
	Z	6,10	6,30	6,20	6,20	6,10	6,18	0,0837	23,60%

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os resultados mostraram que o erro medido tende a aumentar conforme aumenta a velocidade de avanço, mais notório no eixo Z. O eixo X teve o melhor desempenho, com um erro máximo de 0,08% no comprimento medido e um desvio padrão médio de 0,07 mm. O eixo Y teve um bom desempenho, com um erro máximo de 1,44% e um desvio padrão médio de 0,06 mm, ligeiramente menor que o eixo X, mostrando que se trata de um erro sistemático e não de um erro de precisão no conjunto do eixo. Já o eixo Z teve o pior desempenho, com um erro máximo de 23,60% e um desvio padrão médio de 0,13 mm. Ocorre que, durante o teste, o eixo Z sofreu um desvio devido ao afrouxamento do parafuso que prende o acoplamento do motor de passo ao

fuso trapezoidal. Contudo, obteve-se uma demonstração satisfatória da máquina e pôde-se comprovar seu desempenho.

Para chegar à repetibilidade final da máquina, deve-se somar o maior desvio padrão válido encontrado nos testes de usinagem com a deformação real encontrada por meio de simulação por elementos finitos, chegando a uma repetibilidade final de $\pm 0,387$ mm.

A Tabela 4 apresenta os dados finais da máquina.

TABELA 4

Especificações do protótipo

Modelo	Área útil	Potência fresadora	Precisão	Repetibilidade	Peso	Custo
Protótipo	350 x 350 x 70 mm	530 W	0,02 mm	$\pm 0,387$ mm	18 kg	R\$ 3.700,00

Fonte: Elaborada pelos autores.

O protótipo desenvolvido tem: uma área útil de 350 x 350 x 70 mm, menor do que o estimado em razão do espaço ocupado pelo cabeçote móvel e dos ajustes feitos na fixação dos eixos e fusos; uma potência fresadora de 530 W, podendo aumentar mediante a aquisição de uma máquina fresadora mais potente; uma precisão calculada de 0,02 mm, por causa da configuração do *driver* de acionamento; uma repetibilidade de $\pm 0,387$ mm, o que é esperado por conta da menor rigidez estrutural e pela escolha de materiais de baixo custo, porém com potencial para melhorias futuras; um peso de 18 kg, também com potencial de redução de peso, em especial na estrutura móvel; um custo de R\$ 3.700,00, consideravelmente mais baixo que outras máquinas disponíveis no mercado e próximo do estipulado para o projeto, ressaltando-se sua fabricação quase artesanal e sem nenhum ganho de escala, que é inerente à produção de máquinas comerciais, conforme indicado na Tabela 1.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste trabalho consistiu em mostrar o desenvolvimento e a construção de uma fresadora CNC multifunção, para se obter uma máquina de menor tamanho

e mais barata do que as máquinas disponíveis no mercado e suficientemente rígida para usinar metais como alumínio e latão.

Inicialmente, foi feita uma pesquisa de máquinas comerciais, utilizada como base para a condução deste trabalho. Após o estudo da concepção da máquina, definiram-se o dimensionamento e a seleção dos principais componentes. Por fim, após terminada sua construção, submeteu-se a máquina a testes, por meio dos quais foi possível avaliar sua funcionalidade e seu desempenho.

A concepção e o desenvolvimento da máquina alcançaram todas as finalidades desejadas, como a movimentação em três eixos e o cabeçote intercambiável, sendo um equipamento bastante robusto e com um custo total de R\$ 3.700,00.

Algumas características limitadoras da fresadora CNC são: sistema manual de troca de ferramenta e cabeçote; rotação fixa do seu motor de corte, permitindo somente o controle da velocidade de avanço; acoplamentos não foram os mais adequados, ocorrendo o escorregamento durante a operação de usinagem; alto nível de ruído; vibrações indesejadas durante a movimentação no eixo Y, resultando num erro sistêmico.

Sugestões para melhorias futuras incluem: utilização de um motor *spindle* com controle de rotação; implementação de um sistema automatizado para troca de ferramenta; aquisição de um módulo *laser* mais potente para realizar cortes em chapas de MDF; substituição dos acoplamentos entre os motores de passo e os fusos trapezoidais; construção de uma cabine antirruído que envolva a máquina; substituição do eixo apoiado em mancais por um eixo apoiado ao longo do comprimento para evitar quaisquer deflexões no eixo Y; redução do peso da estrutura móvel; utilização de dois fusos trapezoidais ou dois motores para acionar o eixo Y, garantindo um movimento mais uniforme.

A fresadora CNC multifunção se mostrou funcional, sendo testada na realização de cortes e gravações em chapas de MDF. Sua operação é simples, não exigindo grande conhecimento de CNC, apenas um conhecimento prévio para utilização do *software*. Os testes realizados indicam um erro relativo médio de +/- 0,04% para o eixo X e um erro sistêmico médio de +/- 1,20% para o eixo Y, o que pode ser corrigido via *software* e melhorias na estrutura.

DEVELOPMENT OF A LOW-COST MULTIFUNCTION CNC MILLING MACHINE

Abstract

This article aims to model, simulate, and build a smaller and cheaper alternative to CNC machines available on the market that is also sufficiently rigid to machine

metals, such as aluminum and brass, for application in plate cutting and machining small three-dimensional parts. Therefore, the objective is to show the development and construction of a multifunction CNC milling machine (for milling, wood engraving, laser cutting, and laser engraving) to obtain low-cost and easy-to-operate equipment. The project methodology is based on a literature review of the milling process and research on commercial machines. Subsequently, the equipment's design and the components selection were carried out. Finally, after finishing construction, the machine was subjected to tests, through which it was possible to assess its functionality and performance. The development of the machine achieved all the desired purposes, such as movement in three axes and the exchangeable head, a piece of robust equipment (maximum deformation 0,3166 mm), which proved to be functional, simple to operate, and with a total cost at around 50% less than the cheapest machine analyzed.

Keywords: CNC. Milling. Machining.

REFERÊNCIAS

A.T.I. BRASIL. Fuso de rosca trapezoidal. Disponível em: <https://www.atibrasil.com.br/img/cms/Catalogos/Catalogo-Tecnico-Unificado.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2021.

BACHMANN, F.; POPRAW, R.; LOOSEN, P. *High power diode lasers: technology and applications*. New York: Springer, 2007.

CASA DA ROBOTICA. 2022. Disponível em: <https://www.casadarobotica.com/kit-s/kit-s/arduino/kit-placa-uno-smd-com-cabo-para-arduino-shield-cnc-4x-drivers-a4988-e-dissipadores>. Acesso em: 20 dez. 2022.

DEANS, M. G-code for CNC programming (2020 update). Autodesk, May 2018. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/cnc-programming-fundamentals-g-code/>. Acesso em: 9 maio 2021.

DEANS, M. What is CAM (Computer-Aided Manufacturing)? Autodesk, Mar. 2021. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/>. Acesso em: 12 maio 2021.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. *Manufacturing processes: terms and definitions*, division. Berlin: DIN, 2003.

ENGLE, E. What is CAD (Computer-Aided Design)? Autodesk, Apr. 2021. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/what-is-cad-computer-aided-design/>. Acesso em: 10 maio 2021.

- FERNANDO, P. H. L. *Máquinas operatrizes*. Porto Alegre: Sagah, 2018.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Blucher, 1970.
- FITZPATRICK, M. *Introdução à usinagem com CNC*. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- HITZ, C. B.; EWING, J. J.; HECHT, J. *Introduction to laser technology*. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- IDACONTROL. Disponível em: <https://www.idacontrol.com/articles.php?nid=10>. Acesso em: 20 maio 2021.
- LIMA, V. G. de. *Design de uma máquina de corte a laser que utiliza da tecnologia CNC com materiais de baixo custo*. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Caraúbas, 2018.
- LYRA, P. V. A. *Desenvolvimento de uma máquina fresadora CNC didática*. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- MACHADO, Á. R. *et al. Teoria da usinagem dos materiais*. São Paulo: Blucher, 2015.
- MAYER, M. F. *Projeto de router CNC 4 eixos para corte de materiais para prototipagem*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.
- MITSUBISHI. Força de corte. 2018. Disponível em: http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/formula4.html. Acesso em: 18 maio 2021.
- NEOMOTION. *Datasheet* de produto: motores de passo. Disponível em: <http://www.neomotion.com.br/motor-de-passo/>. Acesso em: 15 maio 2021.
- OLIVEIRA, F. B. *Projeto, construção e caracterização de uma fresadora CNC de bancada*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2019.
- POLICOMP. Manual placa controladora CNC R1. 2017. Disponível em: <https://www.policompcomponentes.com.br/produtos/controladores-cnc/r1>. Acesso em: 20 maio 2021.
- RIBEIRO, J. M. de S. Motor de passo. 2013. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aula3-motor-de-passo-2013-1-13-03-2013-final.pdf>. Acesso em: 14 maio 2021.
- SANTOS, D. R. Fuso de esferas recirculantes e guias lineares. *Mecatrônica Atual*, São Paulo, n. 3, abr. 2013.
- SOUZA, A. F. de; ULBRICH, C. B. L. *Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC: princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos profundamente a todos os envolvidos na realização deste trabalho, em especial aos técnicos de laboratório e aos professores da Faculdade de Engenharia, como também aos nossos amigos e familiares, que nos guiaram e apoiaram durante todo o processo.

Contato

Caio Alves de Godoy Cavenaghi
caiogodoy1@gmail.com

Tramitação

Recebido em março de 2022.
Aprovado em novembro de 2022.