Capítulo 05

Protótipo de uma Router CNC (Comando Numérico Computadorizado) em Ambiente Doméstico

Prototype of a CNC (Computer Numerical Control) Router in a Domestic Environment

Dario Resende de Oliveira Soares

Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

Valdecy Cardoso dos Santos

Orientador - Docente do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento conceitual de uma router CNC de baixo custo, com ênfase nos aspectos elétricos e de controle utilizados na automação dos eixos X, Y e Z. A máquina foi modelada integralmente em ambiente CAD, permitindo validar a disposição física dos subsistemas, o curso dos eixos e a compatibilidade entre estrutura, guias lineares, fusos e motores. O sistema de controle foi estruturado a partir da interpretação do código G, da lógica de geração dos sinais STEP/DIR e do acionamento dos motores de passo por drivers dedicados. A topologia elétrica proposta integra placa controladora, drivers, motores e inversor de frequência para o spindle, garantindo sincronização, modularidade e segurança operacional. Os resultados obtidos evidenciam a viabilidade técnica do protótipo e sua aplicabilidade em ambientes educacionais e laboratoriais, servindo como base para futuras implementações físicas e validações experimentais.

Palavras-chave: Router CNC; automação; sistema de controle.

Abstract: This work presents the conceptual development of a low-cost CNC router, with emphasis on the electrical and control aspects responsible for the automation of the X, Y and Z axes. The machine was fully modeled in a CAD environment, enabling the validation of component arrangement, axis travel and compatibility between the structure, linear guides, ball screws and stepper motors. The control system was structured based on G-code interpretation, generation of STEP/DIR signals and the actuation of stepper motors through dedicated drivers. The proposed electrical topology integrates the controller board, drivers, motors and frequency inverter for the spindle, ensuring synchronization, modularity and operational safety. The results demonstrate the technical feasibility of the prototype and its applicability in educational and laboratory settings, providing a foundation for future physical implementation and experimental validation.

Keywords: CNC Router; automation; control system.

INTRODUÇÃO

O Comando Numérico Computadorizado (CNC) é um dos pilares da automação moderna, permitindo que sistemas eletromecânicos executem movimentos precisos a partir de instruções digitais. A integração entre sinais de controle, acionamento elétrico e atuadores mecânicos possibilita a fabricação repetitiva e de alta precisão, sendo amplamente utilizada em ambientes industriais, laboratoriais e educacionais (Yasar; Essex, 2023).

DOI: 10.47573/aya.5379.3.33.5

Entre esses sistemas, a router CNC destaca-se por sua versatilidade e capacidade de realizar cortes e usinagens em materiais como madeira, plásticos e compósitos. Apesar disso, a maior parte das máquinas comerciais apresenta custos elevados ou demanda infraestrutura especializada, dificultando o acesso para estudantes, hobbystas e pequenos empreendedores (Cuzzuol; Siqueira, 2023). Nesse cenário, o desenvolvimento de soluções mais acessíveis torna-se relevante para fins educacionais e de experimentação em automação.

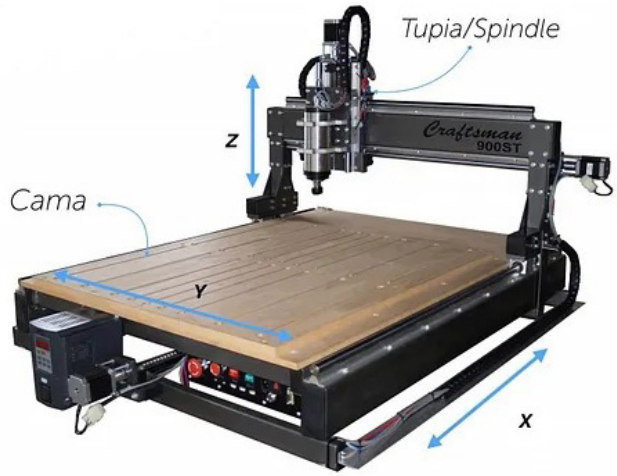
Além da estrutura mecânica, o coração de uma máquina CNC está em seu sistema de controle, composto por circuitos de comando, drivers de potência, motores de passo, geração de pulsos e interpretação de código G. A compreensão desses elementos é essencial para a formação em engenharia elétrica, pois envolve tópicos como eletrônica de potência, sistemas embarcados, instrumentação e controle digital.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento conceitual e a modelagem tridimensional de uma router CNC voltada para ambiente doméstico, com ênfase nos aspectos elétricos e de controle. A modelagem foi utilizada para validar a organização física dos subsistemas e verificar a coerência dimensional do conjunto, enquanto a análise funcional discute a integração entre software de controle, circuitos de acionamento e atuadores. O objetivo é demonstrar a viabilidade de uma plataforma CNC acessível e educacional, contribuindo para o ensino prático de automação e controle numérico.

CARACTERÍSTICAS DE UMA ROUTER CNC

O funcionamento de uma router CNC depende da integração entre seus subsistemas mecânicos, eletrônicos e de controle. De acordo com Altintas (2012), o desempenho e a precisão dessas máquinas resultam da coordenação entre estruturas mecânicas, acionamentos elétricos e algoritmos responsáveis pela interpolação e sincronização dos eixos. Dessa forma, compreender os elementos que constituem o sistema CNC é fundamental para o desenvolvimento de plataformas de baixo custo aplicadas ao ensino e à automação. Esta seção apresenta os principais fundamentos relacionados à arquitetura de controle, atuadores, drivers de potência e componentes mecânicos essenciais ao sistema analisado.

Figura 1 - Típica Fresadora CNC.



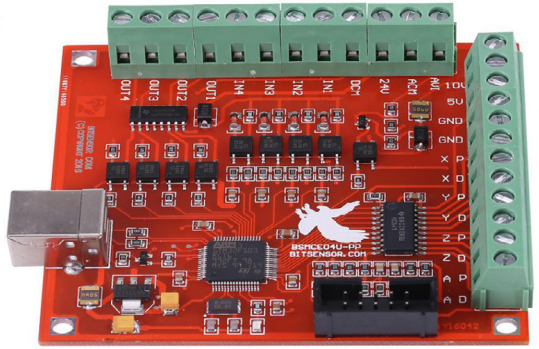
Fonte: Medium, 2017.

Arquitetura de Controle em Sistemas CNC

Em sistemas CNC, o comando numérico é obtido por meio da interpretação de instruções digitais que definem posições, trajetórias e funções auxiliares. O software de controle converte o código G em sinais digitais do tipo STEP (incrementos de movimento) e DIR (sentido de deslocamento), que são enviados à placa controladora. Segundo Altintas (2012), a precisão da máquina depende da correta temporização desses sinais e da capacidade do sistema de interpolar trajetórias de forma sincronizada entre todos os eixos.

A placa controladora atua como núcleo lógico do sistema, distribuindo comandos e coordenando a comunicação entre software, drivers e sensores. Essa arquitetura permite que o operador execute operações repetitivas com precisão, além de incorporar ajustes de velocidade, aceleração e limites de deslocamento para garantir segurança operacional.

Figura 2 - Placa de Controle RNR Ecomotion.



Fonte: MACHSUPORT.

Motores de Passo e Acionamento Eletrônico

Os motores de passo são amplamente utilizados em sistemas CNC devido à sua capacidade de produzir movimentos discretos e repetitivos a partir de sinais elétricos simples, garantindo elevado controle posicional mesmo em arquiteturas de malha aberta. Segundo Coelho (2020), esses motores convertem estímulos elétricos sequenciais em deslocamentos angulares definidos, permitindo que a máquina execute trajetórias precisas sem a necessidade de sensores de realimentação na maioria das aplicações de pequeno porte.

A figura 5 mostra o motor de passo no padrão NEMA23, padrão mais utilizado em routers CNC.

Figura 3 - Motor de Passo NEMA 23.

Fonte: Locatelli, 2021.

O princípio de funcionamento baseia-se na excitação ordenada das bobinas internas, que cria campos magnéticos capazes de atrair o rotor e gerar movimento incremental. Cada sequência de acionamento corresponde a um passo mecânico,

e a repetição desses passos produz o deslocamento necessário ao movimento linear por meio do acoplamento com fusos ou outros mecanismos de transmissão. A precisão nominal está diretamente relacionada ao número de passos por rotação, sendo os motores bipolares de 1,8° (200 passos por volta) os mais comuns em máquinas CNC.

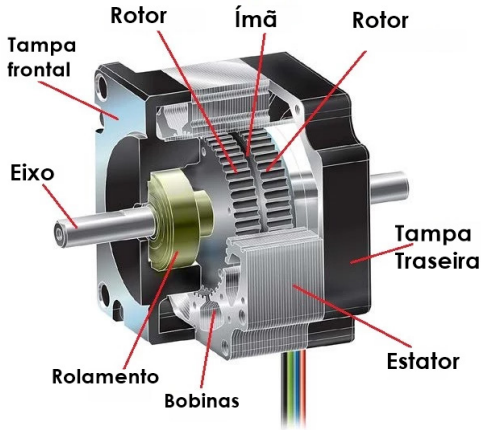
Do ponto de vista elétrico, o acionamento dos motores de passo depende de drivers capazes de regular a corrente aplicada às bobinas. Conforme destaca Kalatec (2020), a técnica de chopper control é fundamental para limitar a corrente e garantir torque adequado em diferentes velocidades de operação. Essa abordagem protege o motor e permite que o sistema mantenha desempenho estável mesmo sob variações de carga. Além disso, os drivers modernos permitem a operação em microstepping, subdividindo cada passo mecânico em frações menores, o que resulta em movimentos mais suaves, redução de vibração e aumento da resolução posicional.

A relação entre corrente, tensão e frequência de pulsos impacta diretamente no torque disponível. Em baixas velocidades, o motor apresenta torque elevado, mas à medida que a frequência dos pulsos aumenta, o torque diminui devido às características indutivas das bobinas. Essa limitação torna essencial o dimensionamento correto do driver e a escolha adequada da tensão de alimentação. Coelho (2020) ressalta que a operação eficiente depende de um equilíbrio entre corrente nominal, dissipação térmica e demanda mecânica do sistema.

Em aplicações CNC de pequeno porte, como routers domésticas, o uso de motores de passo bipolares é amplamente consolidado pela simplicidade de controle, robustez e custo reduzido. Sua integração com drivers dedicados permite que sinais digitais STEP/DIR provenientes da placa controladora sejam interpretados diretamente, convertendo instruções do software em movimento físico com alta confiabilidade. Dessa forma, motores de passo constituem a base do sistema de acionamento da máquina, garantindo precisão, repetibilidade e facilidade de implementação, características essenciais em projetos educacionais e de baixo custo.

Na figura 4, o mesmo motor é mostrado, porém com um corte longitudinal e um transversal, sendo possível entender a sua montagem interna, a disposição das bobinas, ímãs e seu rotor com frisos.

Figura 4 - Esqueleto do Motor de Passo.



Fonte: Locatelli, 2021.

G-CODE

De acordo com Cravo (2022), o G-Code, ou código G, é uma linguagem de programação universal utilizada em maquinários CNC para criar instruções de fabricação de produtos. Esta linguagem emprega letras e números para especificar tarefas e posições das ferramentas da máquina durante o processo de produção. Sua função principal é orientar os motores da máquina nas dimensões x, y e z, determinando velocidade e trajetória. A interpretação do código é realizada por firmwares como o de código aberto, GRBL, ou Repetier, desenvolvido pela Hot-World GmbH, ou o Marlin, desenvolvido pela comunidade Marlin, ou softwares como o próprio Mach3, que são amplamente utilizados no seguimento.

O G-Code compreende uma extensa lista de comandos, cada um responsável por uma operação específica, como movimento linear de eixos, velocidades de corte, definição de sistemas de coordenadas, início e fim do trabalho. Pode ser é utilizado em diversos equipamentos, incluindo impressoras 3D, cortadoras a laser, tornos e fresadoras automatizadas, entre outros (Cravo, 2022).

Abaixo, na figura 4, um exemplo de código em G-Code para fazer o corte de um quadrado de 50mm em uma placa de 5mm de espessura com velocidade de corte configurada para 500mm por minuto. Não foi considerado a espessura da ferramenta.

Figura 5 - Exemplo de Cabeçalho G-Code.

```
; G-code para cortar um quadrado de 50 mm com uma profundidade de 5 mm
G21           ; Configura as unidades para milímetros
G90           ; Usa posicionamento absoluto
G1 F500       ; Define a taxa de avanço para 500 mm/min

; Descer a ferramenta para a profundidade de corte
G0 Z5         ; Eleva a ferramenta para a posição segura de 5 mm acima do material
G0 X25 Y25    ; Move a ferramenta para o canto superior direito do quadrado
G1 Z-5        ; Desce a ferramenta até a profundidade de corte de 5 mm

; Cortar o quadrado
G1 X-25       ; Cortar para o canto superior esquerdo
G1 Y-25       ; Cortar para o canto inferior esquerdo
G1 X25        ; Cortar para o canto inferior direito
G1 Y25        ; Cortar para o canto superior direito

; Levantar a ferramenta
G0 Z5         ; Eleva a ferramenta para a posição segura de 5 mm acima do material
G0 X0 Y0      ; Retorna para a posição de origem

M30           ; Finaliza o programa
```

Fonte: próprio autor.

Driver de Passo

O driver de motor de passo desempenha um papel crucial na automação industrial, sendo o núcleo da tecnologia que possibilita o movimento preciso e eficiente das máquinas. Funcionando como uma ponte entre o sistema de controle computadorizado e o motor de passo em si, este dispositivo converte comandos digitais em movimento mecânico (Kalatec, 2020?)

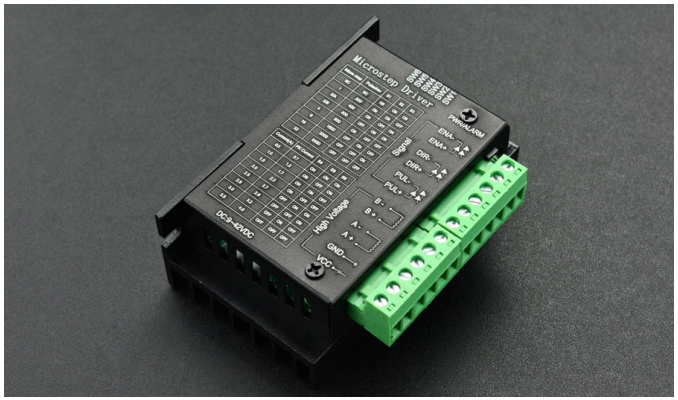
Segundo Kalatec (2020?), fabricante de drivers, ao receber os pulsos de comando vindos da placa de controle, o driver determina o chaveamento dos componentes de alta potência para entregar a corrente necessária ao motor de forma ordenada nas suas bobinas.

De acordo com Cravo (2020), os drivers de passo podem ser divididos em duas categorias, sendo elas:

- Drivers Simples: são aqueles que dependem por completo de sinais externos vindos de um controlador. Eles não possuem lógicas internas para controle dos pulsos digitais ou controle de temporização de pulsos.
- Drivers Inteligentes: esses têm seu funcionamento programável via software. Possuem sistemas de lógica incorporados em sua placa, habilitando funções mais complexas no próprio equipamento, como conexão IHM (Human Machine Interface – Interface Homem Máquina), controle de entradas e saídas, interagir com outros equipamentos via rede etc.

Um exemplo de driver pode ser visto na imagem 7. Onde tanto as entradas de sinal, como alimentação e saída para o motor são feitas através dos conectores na lateral.

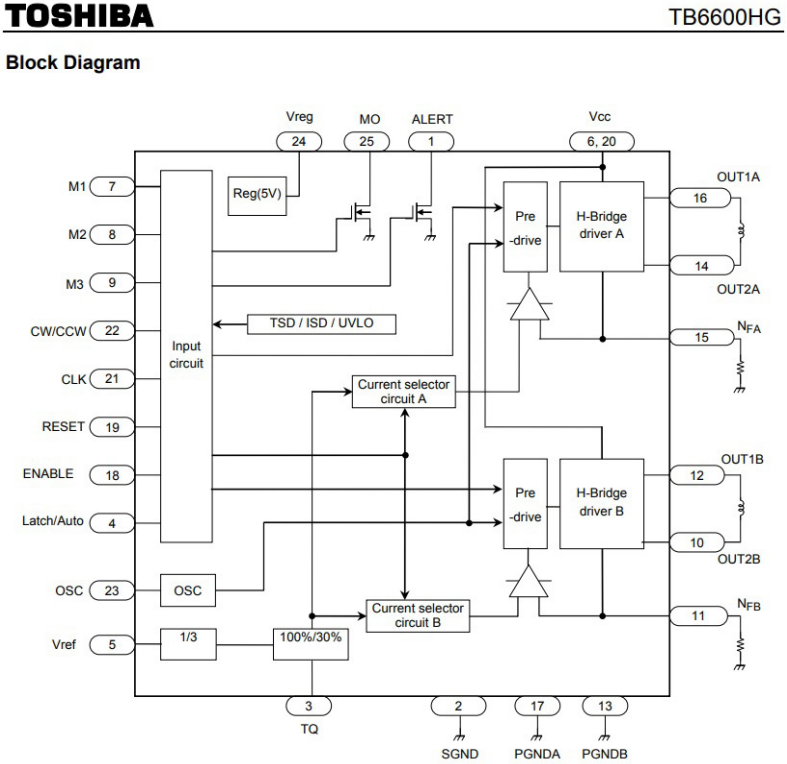
Figura 6 - Driver de Passo.



Fonte: KALATEC

Já a figura 8, mostra um diagrama em blocos do circuito integrado TB6600, componente principal do driver de passo. Ao lado esquerdo as entradas de sinal e ao direito as saídas para as bobinas dos motores.

Figura 7 - Diagrama em Blocos Driver TB6600.



Fonte: MOUSER

Motor Spindle

O motor *spindle* é frequentemente usado em máquinas CNC, tornos, fresadoras, gravadoras e tem como principal característica sua rotação cinco vezes maior que a de um motor elétrico convencional. São motores a indução que suportam alta frequência. Diferente de motores a indução de 60Hz, seus rolamentos são aperfeiçoados com o uso de materiais cerâmicos e passam por um eficiente balanceamento interno para que possam atingir frequências entre 300 e 400Hz. Chegando a 24.000 RPM (Rotações por Minuto) (Cravo, 2021).

Segundo TECMAF (2020?), fabricante de *spindles*, “Por possuir um rotor curto-circuitado (sistema de gaiola esquilo), este equipamento não possui escovas de carvão e coletores no induzido, eliminando assim o ruído gerado pelo contato entre essas peças”.

Por trabalhar em frequência diferente da rede elétrica de 60Hz convencional, o *spindle* precisa ser alimentado por um inversor de frequência. Caso seja ligado diretamente na rede, haverá a queima do seu estator (TECMAF, 2020?).

Além do diferencial entre motores elétricos universais em relação às rotações elevadas, os *spindles* têm dimensões do conjunto estatórico reduzidas, por conta da frequência de operação. Ou seja, mesmo mais compacto, tem potência e torque elevados (Cravo, 2021).

Na figura 9, um *spindle* da fabricante citada acima, esse modelo é fixado através de parafusos na máquina, diferente de *spindles* com corpo cilíndrico que precisam de um suporte separado do motor.

Figura 8 - Motor *Spindle.*

Fonte: TECMAF

Fuso de Esferas

O fuso de esferas é um atuador mecânico que permite um deslocamento linear. Seu funcionamento se baseia em um eixo roscado com uma pista helicoidal para rolamentos de esfera, funcionando assim como um parafuso de alta precisão, similar a uma barra roscada. Convertendo o movimento rotacional de motores, por exemplo, em movimento linear com atrito consideravelmente baixo (Cravo, 2023).

De acordo com Lipsett (2009), a principal diferença entre um fuso de esferas e uma barra roscada está na forma como a carga é transportada entre as superfícies móveis. Um fuso de esferas utiliza rolamentos de esferas recirculantes para minimizar o atrito e maximizar a eficiência, enquanto uma barra roscada depende de coeficientes de atrito baixos entre superfícies deslizantes. Portanto, uma barra roscada tipicamente não pode alcançar a eficiência de um fuso de esferas (cerca de 90%).

Segundo Cravo (2023), o fuso de esferas é altamente preciso, sendo um dos elementos de movimentação linear mais exatos do mercado. Esse nível de precisão é resultado de seu processo de fabricação, que envolve retífica ou laminação, assegurando uma repetibilidade mínima de 5 centésimos ao longo do deslocamento. Além disso, o fuso de esferas possui alta capacidade de carga e, graças às esferas, alcança uma eficiência de até 98%, proporcionando grande economia em termos de motorização em projetos industriais.

Abaixo, na figura 10, alguns fusos esféricos de espessuras diferentes, com as castanhas de esferas montadas em seus corpos.

Figura 9 - Fusos de Esfera.

Fonte: KALATEC.

DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste projeto foi realizado por meio de modelagem tridimensional utilizando o software Autodesk Fusion 360. Essa abordagem permitiu verificar a organização física dos subsistemas, analisar a coerência dimensional entre os componentes e avaliar o espaço necessário para o deslocamento dos eixos X, Y e Z. Embora não tenham sido realizadas simulações estruturais ou análises de carga, a modelagem foi essencial para validar a disposição dos elementos e garantir a viabilidade de montagem do protótipo.

O modelo contempla todos os principais subsistemas de uma router CNC: estrutura mecânica, sistema de movimentação linear, motorização, acionamento

elétrico e controle numérico. A seguir são apresentadas as justificativas de seleção dos componentes e a descrição dos conjuntos modelados.

Justificativa das Escolhas dos Componentes

A definição dos componentes utilizados no projeto teve como base a busca por baixo custo, facilidade de aquisição e desempenho satisfatório para aplicações em ambiente doméstico. As escolhas foram sustentadas por características técnicas e pela experiência prévia do autor na montagem de um protótipo físico semelhante, o que permitiu validar a compatibilidade entre os elementos mecânicos e eletrônicos.

Estrutura

A estrutura da máquina foi definida com base no uso de perfis de alumínio extrudado, que oferecem um bom equilíbrio entre rigidez, leveza e modularidade. Esse tipo de elemento permite montagem precisa dos componentes e facilita ajustes dimensionais durante o processo de construção. Além disso, a disponibilidade comercial dos perfis e de seus acessórios de fixação contribui para um custo reduzido e para a facilidade de manutenção.

O alumínio extrudado também apresenta boa estabilidade térmica e resistência mecânica adequada para aplicações de pequeno e médio porte, características importantes para garantir a durabilidade do equipamento. Dessa forma, sua utilização se mostrou adequada ao escopo do projeto, proporcionando base sólida para a instalação dos eixos, guias lineares, motores e demais subsistemas da router CNC.

Guias Lineares e Deslizamento

Foram adotadas guias lineares HGR15 com patins recirculantes, pela sua precisão e durabilidade. Esse conjunto garante movimento uniforme, sem folgas perceptíveis, e apresenta excelente resistência ao desgaste. Além disso, possui ampla disponibilidade no mercado nacional, facilitando a reposição.

Sistema de Fusos

Os fusos de esferas foram selecionados por oferecerem excelente precisão de posicionamento e baixa folga axial, características desejáveis em aplicações CNC. Esse tipo de mecanismo possui elevada eficiência mecânica e reduz a necessidade de torque nos motores, favorecendo movimentação suave mesmo em baixas velocidades. Além disso, apresentam durabilidade superior em comparação a fusos trapezoidais, o que contribui para maior estabilidade operacional do sistema. A escolha pelo modelo SFU1605 atende às dimensões e forças envolvidas no protótipo, garantindo deslocamento uniforme nos três eixos.

Motores de Passo

Os motores de passo foram escolhidos por sua capacidade de realizar movimentos discretos com alta repetibilidade, característica fundamental em máquinas CNC operando em malha aberta. Sua operação baseada em pulsos digitais facilita a integração com drivers e placas controladoras, permitindo controle preciso de posição e velocidade.

No protótipo proposto foi adotado um motor padrão NEMA 23, com ângulo de passo de 1,8° (200 passos por volta), corrente nominal de 3 A por fase e torque de retenção em torno de 3,0 N·m, valores típicos de modelos utilizados em routers CNC de pequeno e médio porte. Esse conjunto de características garante torque suficiente para o acionamento dos fusos de esferas e deslocamento estável dos eixos, mantendo ao mesmo tempo boa compatibilidade mecânica e custo acessível.

Drivers de Potência

A seleção dos drivers foi orientada por confiabilidade, facilidade de ajuste e compatibilidade com os motores utilizados. Drivers que operam por modulação de corrente garantem controle estável do torque e proteção contra sobrecorrente e sobretemperatura. A capacidade de operar em microstepping permite movimentos mais suaves e maior resolução, contribuindo para o desempenho global da CNC. Esses dispositivos atuam como interface entre os sinais digitais da controladora e as correntes aplicadas aos motores.

Placa Controladora

A RNR EcoMotion foi adotada como placa principal de controle por ser compatível com o software Mach3 e permitir comunicação via interface USB, dispensando portas paralelas dedicadas. Sua ampla compatibilidade e estabilidade operacional foram fatores determinantes para integração com computadores modernos.

Spindle

O *spindle* de 1,5 kW (2 CV) com pinça ER11 e refrigeração a ar foi selecionado por combinar alta rotação (24000 rpm) e baixo nível de ruído. A alimentação via inversor de frequência 220 V possibilita controle de velocidade e partida suave, além de reduzir vibrações mecânicas. O sistema ER11 oferece compatibilidade com fresas de até 8 mm de haste, suficientes para os tipos de corte previstos.

Software

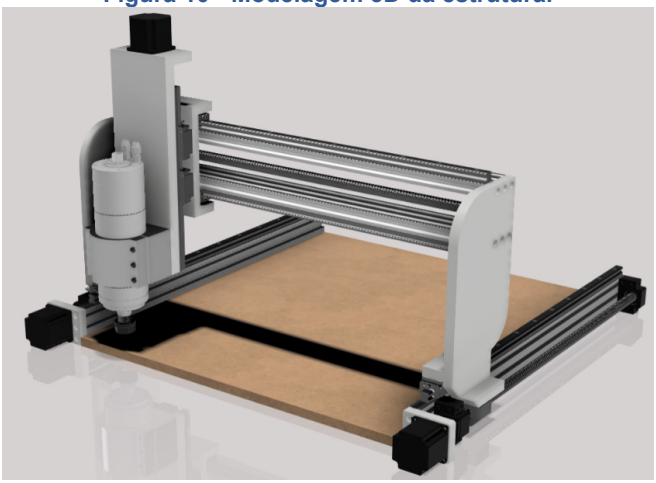
O Mach3 foi escolhido como plataforma de controle por sua interface intuitiva e ampla documentação técnica. O software permite controle simultâneo de múltiplos eixos, personalização de parâmetros e monitoramento em tempo real, sendo ideal para ambientes educacionais e laboratoriais (CNC.XYZ, 2015).

Em conjunto, essas decisões proporcionam um equilíbrio entre desempenho, custo e simplicidade de montagem, atendendo ao objetivo do projeto de desenvolver uma router CNC funcional, acessível e reprodutível em ambiente doméstico.

Estrutura

A modelagem tridimensional da estrutura foi realizada com base em perfis de alumínio extrudado, permitindo verificar dimensões, alinhamento e pontos de fixação de todos os subsistemas. O modelo proporcionou a avaliação do posicionamento das guias lineares, dos fusos de esferas e dos suportes dos motores, garantindo que os elementos fossem acomodados de forma precisa e sem colisões. A modelagem também permitiu validar a área útil do equipamento, confirmando espaço suficiente para a movimentação dos eixos dentro das dimensões projetadas. A representação em CAD serviu como apoio para antecipar ajustes e assegurar compatibilidade entre os componentes antes da construção física do protótipo.

Figura 10 - Modelagem 3D da estrutura.

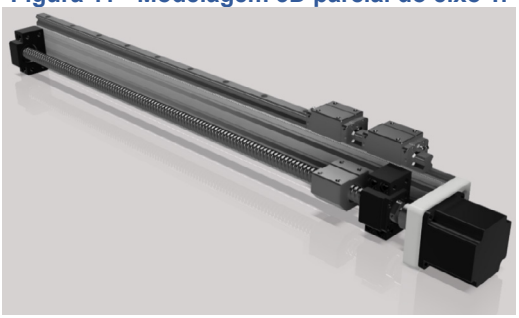


Fonte: próprio autor, 2025.

Eixo X e Y

Os eixos X e Y foram desenvolvidos no ambiente CAD a partir da integração entre guias lineares, fusos de esferas e motores de passo. A modelagem permitiu analisar o curso máximo de deslocamento, a orientação dos patins recirculantes e o alinhamento dos fusos em relação à estrutura. Também foi possível verificar folgas, interferências e espaçamentos necessários para garantir a movimentação plena do conjunto. A disposição dos componentes foi ajustada no modelo para garantir que os eixos trabalhassem de maneira paralela e sincronizada, preservando a área útil planejada. As renderizações geradas auxiliam na visualização do conjunto e na futura etapa de montagem física da máquina.

Figura 11 - Modelagem 3D parcial do eixo Y.



Fonte: próprio autor, 2025.

Eixo Z

O eixo Z foi modelado com foco na rigidez e na precisão do deslocamento vertical. A configuração adotada utiliza um conjunto de guias lineares duplas e um fuso dedicado exclusivamente ao movimento no eixo Z. A modelagem permitiu avaliar a distância máxima de curso, o posicionamento do motor responsável pelo acionamento e o suporte destinado ao *spindle*. Também foram analisados pontos críticos, como possível interferência com a mesa de trabalho ou com a estrutura superior durante deslocamentos extremos. Assim como nos demais eixos, o modelo 3D serviu como ferramenta fundamental para validar a geometria e o comportamento previsto do conjunto.

Integração dos Sistemas

A integração entre os subsistemas foi analisada na modelagem para garantir que os componentes elétricos — placa controladora, drivers e motores — pudessem ser posicionados de forma prática e segura. Os motores foram acoplados diretamente aos fusos por meio de acoplamentos flexíveis, enquanto o *spindle* foi reservado para futura integração no modelo físico.

A configuração elétrica planejada consiste em: software de controle interpretando o código G, placa controladora distribuindo os sinais STEP/DIR, drivers modulando a corrente dos motores, motores de passo realizando o movimento linear, e inversor de frequência para o acionamento do *spindle*.

Embora o modelo tridimensional não simule eletrônica, ele garante espaço para montagem dos módulos e previsibilidade de cabeamento.

Sistema Elétrico e de Controle

O sistema elétrico e de controle constitui o núcleo funcional da router CNC, sendo responsável por transformar instruções digitais do software em movimentos precisos nos eixos X, Y e Z, além de comandar o acionamento do *spindle*. A arquitetura empregada neste projeto integra o software de controle, a placa controladora, os drivers de potência e os motores de passo, permitindo a coordenação dos eixos de

forma sincronizada e previsível. A modelagem tridimensional auxiliou na definição dos espaços físicos para cada módulo, enquanto o projeto elétrico estabeleceu a lógica de interligação entre os componentes.

Arquitetura de Controle CNC

A interface entre o computador e os atuadores mecânicos é realizada pelo software de controle CNC, que interpreta o código G e o converte em sinais digitais padronizados. Esses sinais são enviados à placa controladora, responsável por distribuir as instruções para cada driver de potência. A comunicação segue o fluxo:

Software de Controle → Placa Controladora → Drivers de Potência → Motores de Passo → Movimento Linear

Os comandos de movimento são transmitidos por meio dos sinais STEP (pulso de avanço) e DIR (direção), que determinam o deslocamento incremental dos motores. A placa controladora assegura a temporização correta dos pulsos e a sincronização entre os eixos, condições essenciais para que as trajetórias programadas sejam reproduzidas com precisão.

Drivers de Potência e Modulação de Corrente

Os drivers de potência atuam como intermediários entre a lógica digital e os motores de passo, realizando a conversão dos sinais STEP/DIR em correntes moduladas para as bobinas. Esses dispositivos utilizam técnicas de controle por chaveamento (chopper), ajustando continuamente a corrente aplicada ao motor para manter torque estável e evitar superaquecimento.

Além disso, os drivers permitem configurar parâmetros fundamentais para o desempenho do sistema como: Corrente nominal do motor, modo de micropasso (full-step, 1/2, 1/4, 1/8, etc.), frequência máxima dos pulsos, ativação via sinal ENABLE, além proteções elétricas (sobrecorrente, curto-circuito e sobretemperatura)

Esses recursos garantem precisão e suavidade nos movimentos, permitindo que os motores executem trajetórias complexas sem perda de passos.

Sistema de Acionamento do *SPINDLE*

O *spindle*, responsável pela rotação da ferramenta de corte, é acionado por meio de um inversor de frequência (IF). Esse dispositivo converte a tensão alternada da rede elétrica em uma frequência ajustável, permitindo controlar diretamente a rotação do motor.

A relação entre frequência e velocidade segue a equação fundamental dos motores de indução: , onde é a frequência do inversor e representa o número de polos do motor.

O uso do inversor oferece vantagens importantes, entre elas: variação contínua da rotação, proteção contra sobrecorrente, partida suave e isolamento elétrico da rede.

Topologia Elétrica e Distribuição de Alimentação

A arquitetura elétrica da CNC foi organizada em dois setores principais: controle e potência, de modo a garantir isolamento adequado, minimizar interferências eletromagnéticas e facilitar a manutenção do sistema.

Setor de Controle (baixa corrente) abrange os circuitos responsáveis pela lógica de comando e comunicação como: alimentação da placa controladora, interface USB com o computador, sinais digitais de comando (STEP, DIR e ENABLE), circuitos de parada de emergência, sensores auxiliares, como chaves de fim de curso.

Esses componentes operam tipicamente entre 5 V e 12 V, garantindo isolação elétrica em relação ao setor de potência e prevenindo danos à eletrônica sensível.

Setor de Potência (acionamento dos motores e spindle) é responsável por fornecer energia aos atuadores da máquina como: drivers dos motores de passo, alimentados tipicamente entre 24 V e 36 V, motores de passo, conectados diretamente às saídas de potência dos drivers, inversor de frequência, responsável pelo acionamento do spindle conectado à rede AC.

Para reduzir interferências eletromagnéticas (EMI), recomenda-se separar fisicamente cabos de potência e de sinal, utilizar cabos blindados nos motores de passo e manter o aterramento em ponto único. Essa organização contribui para a confiabilidade do sistema e reduz ruídos que poderiam comprometer a precisão dos movimentos.

Integração Eletromecânica e Cabeamento

A integração entre os sistemas elétricos e mecânicos pode ser planejada de forma a permitir organização eficiente dos cabos, evitando trajetos cruzados e reduzindo o risco de ruído elétrico. A modelagem tridimensional fornece a base para definir o posicionamento dos motores, o alinhamento dos fusos e o espaço necessário para acomodar os cabos de potência e sinal. Mas isso normalmente é bem particular de cada projetista.

RESULTADOS

A modelagem tridimensional permitiu validar a viabilidade física do protótipo proposto, assegurando que todos os componentes pudessem ser integrados sem colisões ou interferências. A análise visual dos modelos indicou coerência dimensional entre: fusos, guias lineares, suportes, motores e estrutura.

Foi possível confirmar o curso total dos eixos X, Y e Z, bem como a área útil de 500 × 500 × 150 mm. A disposição dos motores e acoplamentos mostrou-se funcional, e o posicionamento dos elementos de controle e acionamento permitiu a futura implementação de cabeamento organizado.

Os resultados obtidos reforçam que a arquitetura do projeto é adequada para fins educacionais e de prototipagem, permitindo a construção física em etapas futuras sem necessidade de reestruturação do modelo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do modelo tridimensional de uma router CNC de baixo custo demonstrou que é possível projetar uma plataforma funcional e adequada para fins educacionais com recursos acessíveis. A modelagem permitiu validar a integração entre os subsistemas mecânicos, elétricos e de controle, assegurando coerência dimensional e viabilidade de montagem.

A ênfase nos aspectos elétricos — como o acionamento por motores de passo, o uso de drivers dedicados e o controle através de sinais STEP/DIR — reforça o potencial pedagógico do sistema, especialmente para o ensino de automação, instrumentação e sistemas de controle. O projeto constitui uma base sólida para a implementação física futura, incluindo a instalação do *spindle* e a realização de testes práticos de movimento.

Como continuidade, recomenda-se a montagem do protótipo, a instrumentação com sensores de fim de curso, a calibração dos eixos e a integração completa com o software de controle. Esses passos permitirão validar experimentalmente o desempenho do sistema e complementar o estudo com medições reais de precisão e repetibilidade.

REFERÊNCIAS

ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design**. 2°ed. New York: Cambridge University Press 2012. 366 p.

CNC.XYZ. MACH3**.** 2015. Disponível em: < https://wiki.cnc.xyz/Mach3>. Acesso em: 28 mai 2024.

AMERICAN MICRO INDUSTRIES. **CNC Milling Machine vs. CNC Router**. 2022. Disponível em: <https://www.americanmicroinc.com/resources/cnc-milling-machine-vs-cnc-router/#what-router>. Acesso em: 21/11/2024

COELHO, I, **O que é motor de passo?** Entenda seu funcionamento e aplicações. 2020. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/o-que-e-motor-de-passo-entenda-seu-funcionamento-e-aplicacoes/>. Acesso em: 29 mai 2024.

CRAVO, E. **3 Dicas para escolher o Drive do seu Motor de Passo.** 2020. Disponível em: < https://blog.kalatec.com.br/dicas-para-escolher-o-drive-do-seu-motor-de-passo/>. Acesso em: 28 mai 2024.

CRAVO, E. **Código G para Usinagem CNC:** o que é, funções e modais. 2022. Disponível em: <https://blog.kalatec.com.br/codigo-g/>. Acesso em: 03 mai 2024.

CRAVO, E. **Como funciona o Spindle Motor?** Entenda neste guia completo!. 2021. Disponível em: < https://blog.kalatec.com.br/spindle-motor/>. Acesso em: 28 mai 2024.

CRAVO, E. **Fuso de Esferas:** tipos, aplicações e como dimensionar!. Disponível em: < https://blog.kalatec.com.br/fuso-de-esferas/>. Acesso em: 29 mai 2024.

CRAVO, E. **Motor de Passo:** o que é, como funciona e para que serve. 2021. Disponível em: < https://blog.kalatec.com.br/motor-de-passo/>. Acesso em: 29 mai 2024.

CUZZUOL, G. S.; SIQUEIRA, J. P. R. **Projeto De Construção De Uma Router Cnc Utilizando Rnr Ecomotion**. 2023.

KALATEC AUTOMAÇÃO. **Driver para motor de passo.** 2020? Disponível em: <https://www.kalatec.com.br/drivers-motores-de-passo/#:~:text=O%20que%20é%20o%20driver,movam%20com%20precisão%20e%20eficiência.>. Acesso em: 07 mai 2024.

LIPSET, R. A. **Ball Screws and Lead Screws** – The Real-World Difference. 2009.

LOCATELLI, C. **Introdução ao Motor de Passo**. 2021. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/blog/motor-de-passo/introducao-ao-motor-de-passo>. Acesso em: 03 mai 2024

MEDIUM. **GUIA:** Entendendo a fresadora CNC. 2017. Disponível em: <https://medium.com/bsbfablab/guia-entendendo-a-fresadora-cnc-583fa153ef98>. Acesso em: 02 mai 2024.

NEWFANGLED SOLUTIONS, **MACH3**. Disponível em: <https://www.machsupport.com/software/mach3/>. Acesso em: 02 mai 2024

ORIENTAL MOTOR. **Motores de Passo, Drivers e Controladores**. 2020? Disponível em: <https://www.orientalmotor.com.br/motores-de-passo/index.html#:~:text=Os%20motores%20de%20passo%20permitem,para%20aceleração%20rápida%20e%20resposta.>. Acesso em: 03 mai 2024.

TECMAF. **MOTOR SPINDLE:** TUDO O QUE VOCÊ PRECISA SABER. 2020? Disponível em: <https://spindles.tecmaf.com.br/en/motor-spindle-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em: 28 mai 2024

YASAR, K; ESSEX, D. **Computer Numerical Control (CNC).** 2023. Disponível em: <https://www.techtarget.com/searcherp/definition/computer-numerical-control-CNC>. Acesso em: 19 nov 2024.