

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CONTROLE DE MÁQUINAS CNC

HENRIQUE B. REZENDE, MARIA EDUARDA S. BASTOS, MATUSALÉM M. LANES, ANDERSON G. PIRES

*Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG- Unidade Leopoldina
Rua José Peres, 558, Centro, Leopoldina MG, Brasil, 36700-000*

*E-mails: henriqueb_rezende@hotmail.com, mariaeduarda_bastos@hotmail.com,
mmlanes@cefetmg.br, agpires@cefetmg.br*

Abstract— The development of manufacturing processes that uses Computer Numeric Control has provided high precision, quality and productivity to manufacturing production. However, the high cost to purchase softwares and machines that use this technology precludes the usage of them in institutions of technical and superior education. Knowing that, this work presents a computational and hardware interface that interprets G Code routines and controls a CNC machine, triggered by steppers motors. The computational interface accomplishes the reading of routines in G Code, decode and send them to a control board with a Tiva C Series TM4C123G embedded in it. This board processes the information and uses it to control the CNC machine. To validate the system, a machining center prototype was developed. The results from experimental study are presented as well as the analysis of the CAM system performance.

Keywords— Computer Aided Manufacturing, Computer Numeric Control, G Code, Human-machine Interface, Machine Tool.

Resumo— O desenvolvimento de processos de fabricação utilizando a tecnologia de Controle Numérico Computadorizado permitiu uma produção com alta precisão, qualidade e produtividade. Todavia o elevado custo de aquisição de *softwares* e máquinas com essa tecnologia restringe seu emprego por parte das universidades e escolas técnicas. Sabendo disso, este trabalho apresenta uma interface computacional e de *hardware* para interpretação de rotinas em Código G e controle de máquinas CNC acionadas por motores de passo. A interface computacional realiza a leitura da rotina em Código G, decodificando-a e enviando a uma placa de controle, que possui como elemento principal o microcontrolador Tiva C Series TM4C123G, os comandos de controle da máquina CNC. A fim de validar o sistema CAM, um protótipo de centro de usinagem com três eixos foi construído. Por fim, são elencados os resultados obtidos a partir da realização de ensaios experimentais e análises de desempenho do sistema CAM, assim como do protótipo construído.

Palavras-chave— Manufatura Auxiliada por Computador, Controle Numérico Computadorizado, Código G, Interface Homem-máquina, Máquina-ferramenta.

1 Introdução

Diante da globalização e o intenso crescimento da concorrência, os ambientes industriais necessitam de uma contínua otimização de seus processos produtivos. As exigências em termos de diversidade, quantidade e qualidade, tornam crucial o investimento e a atualização dos métodos e tecnologias utilizadas na manufatura (GARCÍA; HORIKAWA, 2008).

Inicialmente, os processos de fabricação eram executados por meio de máquinas-ferramenta operadas manualmente. Todavia, com o progresso tecnológico das últimas décadas, os eixos dessas máquinas passaram a ser controlados por Controle Numérico (NC), por meio de cartões perfurados ou fitas magnéticas e, mais recentemente, por Controle Numérico Computadorizado (CNC) (SANTOS, 2011). Dessa forma, as máquinas-ferramenta eletromecânicas computadorizadas são popularmente conhecidas como máquinas CNC por utilizarem este tipo de tecnologia. Dentre as grandes vantagens encontradas na utilização dos sistemas computadorizados estão a alta produção, qualidade, e precisão, além da possibilidade de integração entre sistemas (ZHAO; LIU; LI, 2016).

As máquinas CNC são encontradas em vários ambientes da manufatura, sendo utilizadas na fabricação de peças por meio de usinagem, onde ferramentas cortantes retiram materiais formando peças com diversos tamanhos e formatos, bem como na impressão 3D, através de sucessivas camadas de depósitos de

materiais que constituem um modelo tridimensional (OLIVEIRA, 2012).

Em comparação com as máquinas-ferramenta convencionais, as máquinas CNC trouxeram importantes benefícios para o processo de fabricação. Por serem comandadas por códigos implementados em um computador, é possível produzir peças iguais com um único programa de computador, aumentando significativamente a produção dos ambientes fabris. Além disso, a complexidade de se fabricar produtos com tamanhos e formatos diferentes foi bastante reduzida, visto que, de uma maneira simplificada, para produzir peças diferentes, basta compilar códigos diferentes. Estes benefícios foram possibilitados pela automação, que permitiu uma maior autonomia dessas máquinas. Atualmente, as máquinas CNC operam de maneira automática, requerendo pouquíssima mediação dos operadores, o que reduziu consideravelmente os erros causados pela operação manual (AZEVEDO, 2017).

Embora as tecnologias de sistemas computadorizados sejam amplamente utilizadas na gestão e execução dos processos de fabricação, possuindo conceitos e técnicas bem consolidados no que tange as aplicações industriais, seu emprego por parte das universidades e escolas técnicas ainda enfrenta alguns entraves. Ainda que as máquinas CNC tenham facilitado significativamente a fabricação de produtos utilizados no desenvolvimento de projetos e em sala de aula, principalmente da área de Engenharia, muitas vezes seu uso é restringido no meio acadêmico. A principal

barreira imposta à utilização de sistemas CAM e máquinas CNC no ensino de Engenharia é o elevado custo de aquisição de *softwares* e máquinas com estas tecnologias.

Nesse cenário, este trabalho propõe uma interface computacional e de *hardware* para interpretação de rotinas em Código G e controle de máquinas CNC conforme as instruções passadas por Código G. A interface computacional, implementada em ambiente de desenvolvimento livre, realiza a leitura da rotina em Código G, decodificando-a e enviando a uma placa de controle os comandos necessários para controlar a máquina CNC. A placa de controle desenvolvida possui como elemento principal o microcontrolador Tiva C Series TM4C123G. A fim de validar o sistema CAM, um protótipo de centro de usinagem foi construído.

2 Arranjo de um Sistema CNC

Controle numérico computadorizado (CNC) é um sistema capaz de controlar diversos aspectos das máquinas operatrizes. A grande diferença entre uma máquina-ferramenta manual e uma máquina CNC é a maneira com que seus eixos são movimentados. As máquinas operatrizes convencionais têm seus eixos movimentados manualmente, por meio da rotação de manivelas. Ao passo que, os eixos das máquinas CNC são comandados pelo controle de motores de passo ou servomotores, por intermédio de instruções passadas via Código G (SILVEIRA, 2007).

A maioria dos sistemas CNC podem ser divididos em três partes básicas, conforme ilustrado na Figura 1: unidade de entrada de dados, unidade controladora e unidade de acionamento (CARSTENS; CARSTENS, 2015).

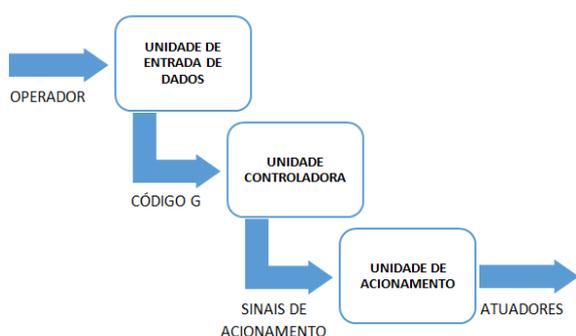


Figura 1. Arranjo de um sistema CNC.

Unidades de entrada de dados são dispositivos de comunicação que transmitem os programas CNC com instruções sobre a fabricação da peça para um computador. Portas seriais ou arquiteturas de interconexões de rede Ethernet geralmente são utilizadas para realizar esta comunicação (AZEVEDO, 2017).

Um programa CNC é formado por linhas com comandos referentes a posição, direção e o movimento que os eixos e ferramentas da máquina CNC devem

obedecer durante a trajetória de fabricação, como também informações de configuração, tais como acionamento e sentido de rotação dos motores das ferramentas de corte, velocidade e tipo de ferramenta a ser utilizada (GOELLNER, 2006).

Almejando padronizar os comandos de controle de máquinas operatrizes, comumente, as máquinas CNC seguem uma padronização constituída por linhas de instruções, chamadas de blocos, formadas por palavras compostas por letras e números. Esse padrão, conhecido como Código G, é definido pela norma ISO 6983.1.

O Código G é composto por duas categorias básicas de funções, sendo elas as funções G, denominadas preparatórias e as funções M, chamadas miscelâneas. As funções preparatórias possuem o papel de indicar para a máquina-ferramenta como ela deve atuar, preparando-a para executar movimentos. Já as funções miscelâneas são funções complementares às funções preparatórias e atuam, geralmente, como chaves programáveis de componentes da máquina, tais como, fusos, motores e sistemas auxiliares (AZEVEDO, 2017).

Outros elementos do Código G são funções auxiliares, que complementam os blocos de funções preparatórias ou miscelâneas. A Tabela 1 apresenta uma lista de caracteres sugeridos pela norma ISO 6983.1, que comumente estão presentes em um Código G.

Tabela 1. Caracteres Encontrados no Código G (AZEVEDO, 2017).

Caractere	Significado
O	Número de Programa
N	Identificação de linha
G	Função Preparatória
X	Eixo X
Y	Eixo Y
Z	Eixo Z
R	Raio
F	Taxa de Avanço
S	Rotação do Fuso
H	Compensação do comprimento da ferramenta
D	Compensação de raio da ferramenta
T	Definição de Ferramenta
M	Função Miscelânea

A unidade controladora, por sua vez, é responsável por transformar as instruções dos programas CNC em trajetórias de movimentação e outras funções da máquina (CARSTENS; CARSTENS, 2015). Essa unidade envia sinais de comandos para a unidade de acionamento, para que esta mesma acione os motores

¹ Norma ISO 6983-1:2009. *Automation systems and integration -- Numerical control of machines -- Program format and definitions of address words -- Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems*. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/34608.html>. Acesso em: 25 de março de 2018.

e demais componentes eletromecânicos da máquina (AZEVEDO, 2017).

A escolha do motor responsável por movimentar um eixo de máquina CNC é motivada por diversos aspectos característicos. Por possuírem rotação proporcional à tensão de entrada contínua e por exigirem um sistema de malha fechada que envia a posição do eixo em tempo real para o controlador, geralmente por meio de potenciômetros, codificadores ou geradores tacométricos, os servomotores oferecem uma maior precisão quando comparados aos motores de passo. Todavia, por apresentarem um alto custo, esse tipo de motor é indicado apenas para máquinas de grande porte e que requerem controle de velocidade, potência e aceleração (FITZPATRICK, 2013).

Os motores de passo, por sua vez, possuem um custo significativamente inferior aos servomotores por serem capazes de controlar velocidade, posição e direção sem necessitarem de realimentação em malha fechada, desde que o torque do motor seja capaz de movimentar a carga acoplada (GOELLNER, 2006). Esse tipo de motor é indicado para máquinas de menores dimensões, submetidas a cargas inferiores (WERNER, 2015). Para determinar a posição do eixo faz-se necessário que o controlador conheça o incremento angular deslocado ao se aplicar um pulso digital e a posição inicial do rotor. Uma volta completa do eixo de um motor de passo pode ser dividida em inúmeros incrementos angulares, o que permite um deslocamento com elevada precisão. A velocidade do motor de passo é determinada pela frequência dos pulsos aplicados, quantidade de passos por volta do motor e da configuração de micropassos do *driver* (CHAPMAN, 2013). Por trabalharem em malha aberta, sistemas de controle de motores de passo não percebem distúrbios e variações, que podem ocorrer com mais frequência quando os eixos dos motores são submetidos a cargas pesadas (FITZPATRICK, 2013).

Apesar de serem úteis em aplicações de precisão, os motores de passo não apresentam características adequadas para aplicações em altas velocidades como é o caso da rotação de ferramentas de corte em máquinas CNC. Nesse caso, geralmente são utilizados motores de indução trifásicos, chamados de *Spindle* quando empregados na rotação de ferramentas de corte em máquinas CNC.

Em companhia com os dispositivos atuadores, elementos mecânicos como fusos de esferas e guias lineares, garantem a elevada precisão encontrada nos eixos das máquinas CNC, que podem operar com uma precisão na ordem de um milésimo de milímetro.

3 Sistema CAM

Esta seção apresenta a parte de *software* do sistema proposto, formada por uma interface homem-máquina (IHM) e um algoritmo embarcado em um microcontrolador. Os dois *softwares*, utilizados no controle de máquinas CNC, trocam informações por meio de uma comunicação serial com dispositivo

UART (do inglês, *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), conforme ilustrado na Figura 2.

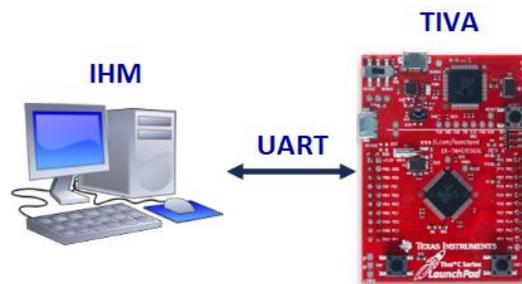


Figura 2. *Software* do sistema CAM.

3.1 Interface Homem-Máquina

A IHM foi implementada em Visual Basic.NET, utilizando o ambiente de desenvolvimento de código livre Visual Studio edição *Community*. A Figura 3 apresenta a tela inicial do programa. Nesta janela é possível inserir um arquivo de texto contendo uma rotina em Código G; escolher o idioma da aplicação (inglês ou português); alterar ou excluir a rotina em Código G; enviar a rotina para o *software* embarcado no microcontrolador e começar, pausar ou encerrar o processo de execução da peça.

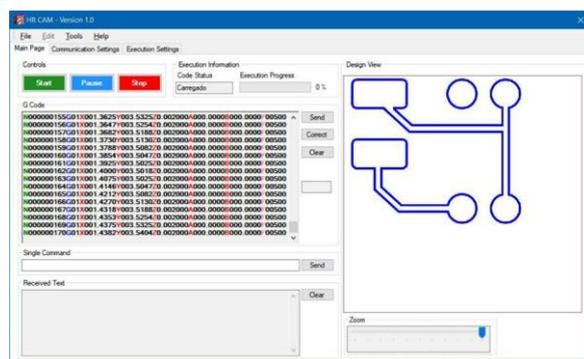


Figura 3. Tela inicial da IHM.

Por se tratar de uma versão inicial do sistema, uma estrutura de Código G formada com uma organização específica dos dados a serem executados no sistema CAM foi adotada. De acordo com essa estrutura, não é aceitável comandos em sequência em uma mesma linha, ou seja, cada bloco de Código G deve conter um comando independente. Além disso, os blocos podem conter no máximo 64 caracteres, haja vista que essa é uma quantidade apropriada para comportar um comando de Código G.

Além de inserir uma rotina completa em Código G, escrita em um documento de texto, o programa permite ao usuário enviar comandos individuais por meio da caixa de texto de rótulo *Single Command*.

Apesar de existir uma extensa quantidade de funções definidas pela norma ISO 6983.1 Nessa versão

inicial apenas as funções apresentadas na Tabela 2 podem ser executadas.

Tabela 2. Funções executadas pelo sistema CAM.

Caractere	Significado
G00	Avanço Rápido
G01	Interpolação Linear
G20	Coordenadas em Polegadas
G21	Coordenadas em Milímetros
M03	Gira o Eixo-Árvore no Sentido Horário
M05	Desliga o Eixo-Árvore
M08	Liga Sistema de Refrigeração
M09	Desliga Sistema de Refrigeração
M30	Rotação do Fuso

Na mesma janela, denominada *Main Page*, são exibidas informações quantitativas a respeito do progresso da execução da peça, por intermédio das caixas de texto “*Received Text*” e “*Execution Progress*”, assim como, por uma barra de progresso. A caixa de texto *Received Text* oferece um *feedback* a respeito da execução, com mensagens que indicam a o estado atual do processo. Por outro lado, a caixa de texto *Execution Progress* é responsável por indicar o status do Código G inserido pelo usuário. A barra de progresso, por sua vez, é preenchida de maneira gradativa, exibindo a porcentagem de procedimentos executados pela máquina.

Uma tela de exibição, apresentando o desenho prévio da peça a ser fabricada, também é fornecida pela janela. O desenho é confeccionado a partir das informações contidas na rotina em Código G. A cor da peça é alterada de azul para verde de maneira gradativa, de acordo com o andamento do processo.

Ademais, na janela *Main Page* o usuário tem acesso a informações a respeito da interface, das funcionalidades fornecidas e sobre a versão atual do programa, como é comum em diversas aplicações comerciais.

Além da janela descrita anteriormente, a interface possui outras duas abas, denominadas *Communication Settings* e *Execution Settings*.

A aba *Communication Settings*, mostrada na Figura 4, permite o preenchimento das informações a respeito da comunicação serial entre os *softwares* do sistema CAM. Nessa aba, existem duas caixas de seleção. A primeira delas apresenta as portas seriais disponíveis no computador, enquanto que a segunda exibe diversos valores de taxa de transmissão, permitindo ao usuário a escolha do valor desejado para a comunicação. Por meio de dois botões, *Open Port* e *Close Port* ocorre a abertura e o encerramento da comunicação.

Na aba *Execution Settings*, apresentada na Figura 5, realiza-se a configuração de parâmetros relacionados ao processo de execução da máquina. Esses parâmetros são utilizados na configuração de alguns peri-

féricos do microcontrolador e no preenchimento de variáveis importantes do algoritmo embarcado.

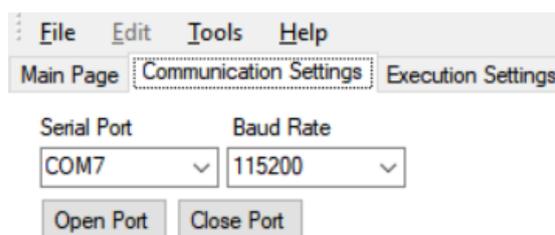


Figura 4. Aba Communication Settings.

Por meio de caixas de texto editáveis, o usuário insere informações a respeito da frequência de PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) e velocidade a serem utilizadas no motor da ferramenta de corte, bem como, informações sobre os motores que movimentam os eixos da máquina, tais como a rotação mínima e máxima do motor de passo, o passo dos fusos de esferas, o número de passos por revolução e o divisor utilizado pelo *driver* para implementação dos micropassos.

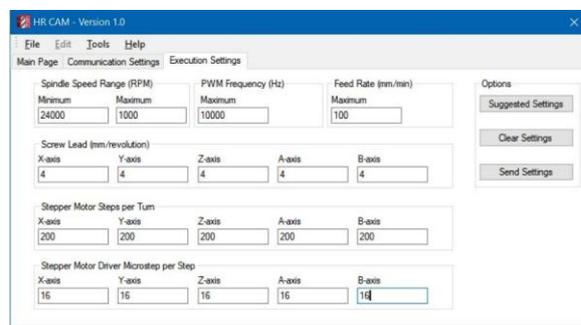


Figura 5. Aba Execution Settings.

Após o carregamento da rotina em Código G, o estabelecimento da comunicação serial e o envio das configurações da máquina-ferramenta, o botão de início da execução é habilitado e pode ser pressionado pelo usuário para dar início ao processo de fabricação.

Cada elemento presente na interface é associado a um código em VB.NET responsável por executar suas funcionalidades. A interface é considerada orientada a eventos, uma vez que seu algoritmo executa as funcionalidades reagindo aos eventos ocorridos ao longo da utilização da interface por parte do usuário.

3.2 Programa Embarcado no Microcontrolador

O algoritmo embarcado em um Tiva C Series TM4C123G da *Texas Instruments* possui a responsabilidade de interpretar a rotina em Código G transmitida pela IHM e executar os comandos na máquina CNC.

O *software* foi implementado na versão gratuita do ambiente de desenvolvimento *IAR Embedded Workbench*, em linguagem de programação C e com o auxílio da biblioteca *Tivaware*.

A biblioteca *TivaWare* é uma coleção de funções de controle dos periféricos do Tiva C Series TM4C123G, implementada em linguagem C. Trata-se de uma alternativa à programação do microcontrolador por meio da manipulação direta de seus registradores, que pode se mostrar bastante complexa, demandando um tempo maior para o desenvolvimento de sistemas. A Figura 6 apresenta o fluxograma simplificado do algoritmo embarcado.

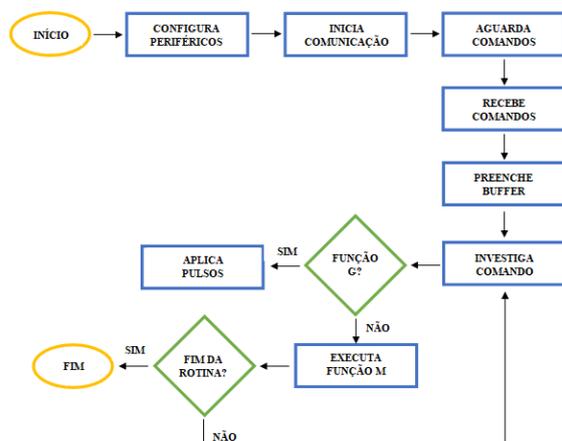


Figura 6. Fluxograma simplificado do programa embarcado.

Com o pressionamento do botão “Start” na IHM, o algoritmo embarcado inicia sua execução realizando a configuração dos periféricos utilizados. A primeira configuração diz respeito à frequência de processamento do microcontrolador. Em seguida, são configurados os periféricos GPIO (do inglês, *General Purpose Input/Output*), UART e PWM, bem como os pinos e temporizadores a serem utilizados.

Após a etapa de configurações iniciais, o algoritmo estabelece a comunicação serial com a IHM, e então, aguarda o envio das informações de configuração da máquina e os blocos de Código G. Outra possibilidade é o algoritmo receber dados representando a ação dos botões de controle “Pause” e “Stop”. Sabendo que a comunicação serial por UART, não oferece grandes velocidades de comunicação, um *buffer* de comandos foi criado para prevenir atrasos de comunicação.

No momento em que o microcontrolador recebe um caractere da interface, várias investigações são realizadas a seu respeito. Quando é recebido um caractere que representa algum dos botões “Start”, “Stop” ou “Pause”, a execução da máquina é iniciada, interrompida ou suspensa, respectivamente. Caso o caractere recebido represente a transmissão das configurações de execução da máquina, os caracteres recebidos posteriormente alteram os valores das variáveis de configuração. Por outro lado, caso o microcontrolador receba um caractere que não se enquadre em nenhuma das condições descritas acima, entende-se que ele faz parte de um bloco de Código G, e por consequência, uma função que analise e execute os comandos entra em operação.

O preenchimento do *buffer* de comandos e a execução dos blocos ocorre repetidamente até que não haja mais linhas de Código G a serem executadas, encerrando-se assim a fabricação.

3.3 Interface de Comunicação

Para estabelecer uma comunicação entre *softwares* pertencentes a um sistema computadorizado, faz-se necessário o estabelecimento de uma padronização sobre a troca de informações, a fim de garantir que tais informações cheguem de maneira correta aos seus respectivos destinos e sejam devidamente interpretadas.

A troca de informações entre os *softwares* deste projeto é realizada por meio de uma comunicação serial com dispositivo UART. Nesse tipo de comunicação, os bits são enviados um por vez a cada ciclo de transmissão. Apesar de apresentar velocidades de transmissão mais lentas se comparada à transmissão paralela de dados, a comunicação serial é capaz de transmitir informações em distâncias mais elevadas e oferece uma significativa simplicidade na implementação de seus protocolos. Este tipo de comunicação depende de um dispositivo para que a transmissão dos dados seja realizada. A UART é um dos dispositivos mais utilizados para tal aplicação, por conta da sua simplicidade de *hardware* e de implementação.

O dispositivo UART consiste na utilização de um par transmissor/receptor, denominados Tx e Rx, para a conversão de dados paralelos em seriais para a transmissão assíncrona. A comunicação por UART é classificada como *full-duplex*, uma vez que é capaz de transmitir em ambos os sentidos e de maneira simultânea, haja vista que cada terminal transmissor e receptor possui um cabo próprio.

Tanto o IDE no qual a interface foi implementada quanto a biblioteca *TivaWare*, utilizada no microcontrolador, fornecem ferramentas que simplificam a comunicação entre sistemas utilizando UART. Para que a comunicação seja bem-sucedida, basta garantir que as configurações de comunicação definidas na interface e no microcontrolador sejam compatíveis.

4 Placa de Controle

Os comandos interpretados pelos *softwares* do sistema CAM são transferidos para uma etapa de *hardware*. Esta terceira etapa consiste em uma placa de controle responsável por transformar as informações passadas pelo microcontrolador em ações de comando dos mecanismos atuadores da máquina CNC.

A placa de controle, apresentada na Figura 7, é constituída por uma placa de circuito impresso (PCI) com diversos módulos gerenciados pela Tiva C Series TM4C123G. A confecção de uma PCI, além de proporcionar maior robustez, visa uma melhor apresentação dos circuitos de controle.

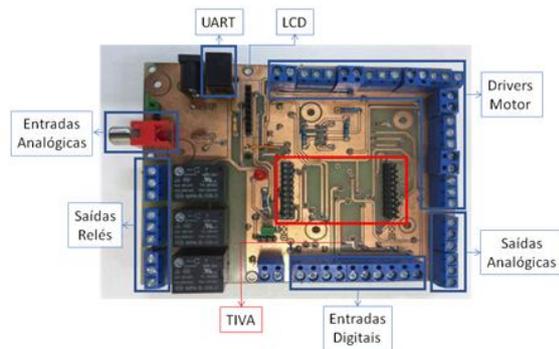


Figura 7. Placa de Controle

Além de comportar o microcontrolador, a placa possui módulos de acionamento de *drivers* de motores de passo, acionamento por relé, saídas analógicas, entradas digitais isoladas, entradas analógicas, comunicação serial, comunicação sem fio e interface com display de LCD.

A placa possibilita a utilização de motores de passo na movimentação dos eixos de máquinas CNC, por intermédio de *drivers* de motores de passo, que produzem a alimentação sequencial das bobinas desse tipo de motor, bem como, o acionamento de motores de indução para a rotação de ferramentas de corte, por meio de inversores de frequência que utilizam sinais de PWM. Além disso, a placa possibilita o acionamento de elementos auxiliares que desempenham um importante papel na fabricação de peças, tais como os sistemas de iluminação, refrigeração e aspiração de material usinado.

Ademais, por intermédio da placa de controle é possível conectar sistemas de sensoriamento analógicos e digitais; escolher o tipo de comunicação, serial ou sem fio; e dispor de uma tela de LCD localizada junto à máquina CNC para visualização de informações semelhantes às apresentadas na interface do software CAM.

5 Protótipo de Centro de Usinagem de Três Eixos

Para realizar experimentações no sistema CAM implementado em um ambiente que promovesse condições próximas às encontradas em uma máquina-ferramenta CNC industrial, um protótipo composto por estruturas mecânicas responsáveis por emular o funcionamento de um centro de usinagem CNC esta sendo desenvolvido. As estruturas que compõem o protótipo são a placa de controle; o sistema eletromecânico, formado pelos motores de passo e estruturas mecânicas de movimentação; os *drivers* de motor de passo; a fonte de alimentação em corrente contínua de 24 V e demais componentes auxiliares. Todos os componentes descritos acima são dispostos em uma base fabricada em fibra de madeira de média densidade (MDF, do inglês *Medium-Density Fiberboard*), conforme apresentado na Figura 8, com dimensões de 500 mm de largura, 700 mm de comprimento e 15 mm de espessura.

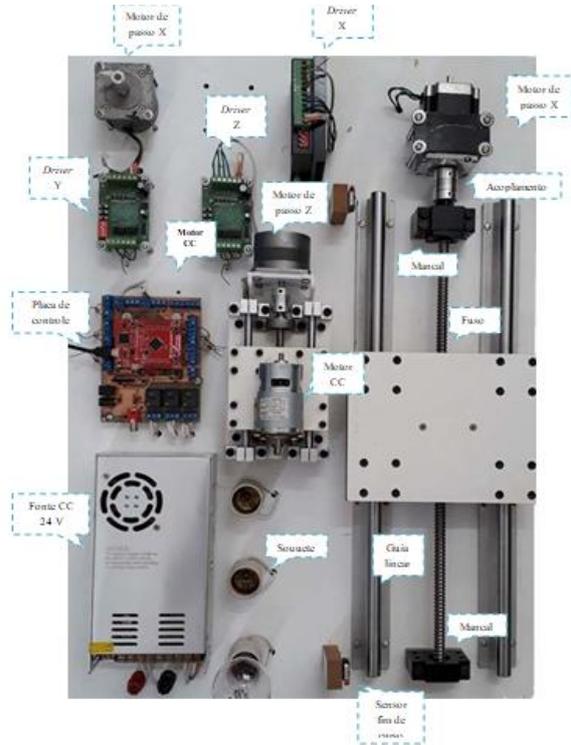


Figura 8. Protótipo de centro de usinagem em desenvolvimento.

Uma vez que o protótipo representa um centro de usinagem CNC de três eixos, ele possui três motores de passo do tipo híbrido, cada um responsável por um eixo da máquina. Um desses motores não possui conexão com estrutura física, sendo utilizado apenas para simular a rotação do eixo Y. Os outros motores encontram-se conectados a estruturas mecânicas similares às encontradas nos eixos X e Z de máquinas CNC. Para o controle dos três motores são necessários três *drivers* de motor de passo.

Um mecanismo formado por um fuso de esferas recirculantes acoplado a um motor de passo e apoiado por mancais com rolamentos internos possibilita o deslocamento suave dos eixos. Fixadas sobre as estruturas físicas dos eixos X e Z encontram-se, respectivamente, as mesas de MDF responsáveis pela fixação da peça a ser usinada e pelo suporte do motor de *S-plinder*.

Em ambos os eixos, rolamentos lineares abertos são utilizados para apoiar as extremidades da mesa e, ao mesmo tempo, permitir seu deslocamento. Esses elementos de suporte encontram-se fixados sob a mesa e apoiados em guias lineares com perfil de alumínio.

Dois sensores de fim de curso limitam o percurso da mesa. No momento em que os sensores são acionados, o microcontrolador interrompe a rotação do motor de passo, imobilizando a mesa.

Como o acionamento via relé funciona basicamente como um interruptor para ligar ou desligar um circuito ou sistema externo. Os relés foram utilizados para o acionamento de lâmpadas, simulando assim, o acionamento de elementos auxiliares como sistemas de iluminação, refrigeração e aspiração de materiais

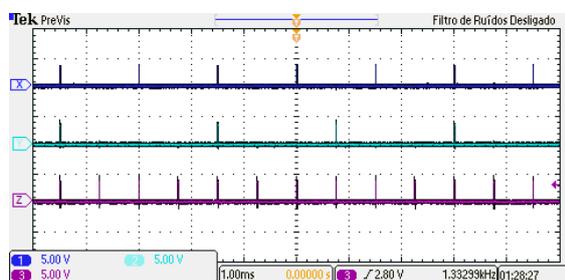
usinados. Dessa forma, a estrutura possui três soquetes para lâmpadas fluorescentes.

Todos os atuadores descritos acima são comandados pela placa de controle hospedeira do Tiva C Series TM4C123G, descrita na Seção 4, e também fixada na estrutura de MDF.

6 Resultados e Discussões

Várias rotinas de Código G foram executadas pelo sistema a fim de avaliar seu funcionamento. A performance dos motores de passo foi avaliada a partir da execução de comandos em Código G pelo Tiva C Series TM4C123G.

A Figura 9 apresenta a captura das formas de onda dos pulsos aplicados aos *drivers* dos eixos X, Y e Z, por meio de um osciloscópio, quando o bloco “N00000001G01X00300.00y00180.00z00600.00a000.00b00000.00F00100” foi executado pelo sistema CAM.



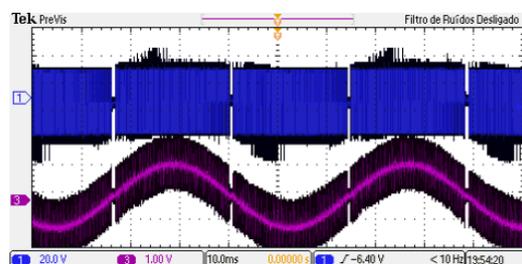
Um parâmetro importante para avaliar o correto deslocamento da mesa é a quantidade de pulsos aplicada em cada eixo. A aplicação de pulsos nos eixos deve começar e terminar simultaneamente, mesmo que a distância a ser deslocada por eixo possua valores diferentes. Para alcançar a uniformização da aplicação, o eixo de maior deslocamento é tido como referência. Na Figura 9, o eixo com maior aplicação de pulsos é o Z. Pelo bloco de comando, é possível confirmar que ele de fato possui o maior valor de deslocamento. O segundo maior eixo é o X, que possui a segunda maior quantidade de pulsos aplicados. Por fim, o eixo Y, possui uma menor distância a ser deslocada, o que justifica sua menor aplicação de pulsos.

A Figura 9, permite ainda, verificar a frequência de deslocamento do eixo de maior quantidade de pulsos (Z). Esse valor, que equivale à velocidade de deslocamento da mesa, é determinado pelo parâmetro F passado no bloco de comando. De acordo com a relação descrita em (1) é possível verificar que a frequência de 1333 Hz corresponde à velocidade de deslocamento passada por Código G, ou seja, 100 mm/min.

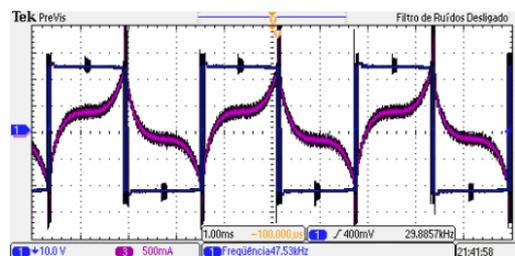
$$F = f_D \frac{P_P}{P_M M_D} 60 \quad (1)$$

Em (1), f_D é a frequência de aplicação de pulsos no eixo de referência, P_P é o passo do fuso de esferas, P_M é o número de passos por volta do rotor e M_D é o número de micropassos gerado pelo *driver* em cada pulso digital.

As curvas de tensão e corrente do motor de passo conectado à estrutura mecânica durante a execução de um comando com velocidade de 100 mm/min são apresentadas na Figura 10. Nessa velocidade o controle de corrente opera em modo PWM.



A Figura 11 apresenta os resultados obtidos quando a velocidade é elevada para 1500 mm/min, o que produz a operação em modo de pulso único.



Por fim, a Figura 12 apresenta os resultados obtidos quando medida, por intermédio de um paquímetro digital, a precisão dos movimentos do motor de passo acoplado à estrutura física do eixo X. Os valores de deslocamento passados por Código G foram de 0,01 mm e 1 mm.



Os testes de desempenho mostraram que o sistema CAM encontra-se totalmente apto a interpretar e executar rotinas em Código G, haja vista que todos os componentes de *software* e de *hardware* do projeto executaram suas funcionalidades de acordo com o esperado.

4 Conclusão

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de um sistema com tecnologia CAM para controle de máquinas CNC acionadas por motores de passo. Além disso, mostrou-se um modelo de protótipo de máquina CNC de 3 eixos, que apesar de estar em fase de desenvolvimento, possui condições de ser utilizado para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido.

Com os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais, foi possível confirmar que o sistema é bastante viável e eficiente, e ainda, possui grandes possibilidades de expansão. Dessa forma, o sistema contribuirá para o desenvolvimento de projetos e para o ensino de Engenharia, permitindo aos discentes ter acesso à fabricação de peças e produtos com qualidade e pequeno custo.

O trabalho abordado é uma proposta nacional e deseja-se que ele possa alcançar novos patamares com aspectos inovadores no campo da utilização de ferramentas CNC. Almeja-se a integração de um sistema controlador de máquina CNC, mas com maiores capacidades de realização de ajustes na fabricação, os quais são importantes durante os processos de usinagem, principalmente a de protótipos. Como destaque de possibilidades do *software*, espera-se um tratamento diferenciado do Código G, de cada comando, de forma que parte do código possa ser executada individualmente e, ainda, a separação de regiões em planos bidimensionais e tridimensionais independentes do código como todo. Espera-se também, a implementação de uma maior variedade de funções em Código G e de funcionalidades para a interface com o usuário, a adequação do sistema a distintas estruturas de Código G, a apresentação do desenho da peça em 3D na janela da interface e a continuação da construção do protótipo, de modo que ele se torne uma máquina CNC de pequeno porte, possibilitando um melhor estudo do desempenho do sistema em uma máquina real.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio fornecido pelo CEFET-MG e pela FAPEMIG.

Referências Bibliográficas

- AZEVEDO, A. L. DE. Fundamentos do CNC para Usinagem. 1. ed. São José dos Campos: JAC Gráfica e Editora, 2017.
- CARSTENS, S. F.; CARSTENS, T. A. Projeto e Fabricação de uma Fresadora CNC para Prototipagem de Placas de Circuito Impresso. Joinville: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2015.
- CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- FITZPATRICK, M. Introdução à usinagem com CNC: comando numérico computadorizado. 1. ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2013.
- GARCÍA, L. N. F.; HORIKAWA, O. Manual and Servo Assisted, Hybrid System for Position Control in Machine Tools. In: 19TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING. , 2008.
- GOELLNER, E. Ferramenta Computacional para Acionamento de Motores de Passo Aplicados ao Projeto de Equipamentos CNC. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2006.
- OLIVEIRA, J. R. DE. Aplicação da Manufatura Auxiliada por Computador (CAM) no Desenvolvimento de Processo de Usinagem: Um Estudo Multi-caso. Marília: Centro Universitário Eurípides de Marília, 2012.
- SANTOS, L. A. F. Planejamento de Trajetórias e Implementação de Técnicas de Posicionamento de Eixos para Dispositivo CNC com Arquitetura de Controle Aberta. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- SILVEIRA, R. C. A. Desenvolvimento de um Equipamento Mecânico com Controle Numérico Computadorizado para Produção de Protótipos em Escala. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- WERNER, G. Desenvolvimento de uma Fresadora CNC para Usinagem em 5 Eixos. Lajeado: Universidade do Vale do Taquari, 2015.
- ZHAO, J.; LIU, Y.; LI, Q. Research on error synthetical modeling of multifunctional composite five-axis CNC machine tool. IEEE, p. 1814–1821, 2016.