

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTOS ACADÊMICOS DE ELETRÔNICA E MECÂNICA  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MECATRÔNICA INDUSTRIAL

CARLIZE TAMANINI PEREIRA  
GABRIEL SOUZA DE AZEVEDO  
THAIS FARIA ABREU

***RETROFITTING DO CONTROLE E IMPLEMENTAÇÃO DO QUARTO  
E QUINTO EIXOS EM UMA FRESADORA CNC DIDÁTICA DE  
PEQUENO PORTE***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2014

CARLIZE TAMANINI PEREIRA  
GABRIEL SOUZA DE AZEVEDO  
THAIS FARIA ABREU

***RETROFITTING DO CONTROLE E IMPLEMENTAÇÃO DO QUARTO  
E QUINTO EIXOS EM UMA FRESADORA CNC DIDÁTICA DE  
PEQUENO PORTE***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, como requisito parcial para obtenção de grau de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial dos Departamentos Acadêmicos de Eletrônica (DAELN) e Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Celso Salamon.

CURITIBA  
2014

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

CARLIZE TAMANINI PEREIRA  
GABRIEL SOUZA DE AZEVEDO  
THAIS FARIA ABREU

### **RETROFITTING DO CONTROLE E IMPLEMENTAÇÃO DO QUARTO E QUINTO EIXOS EM UMA FRESADORA CNC DIDÁTICA DE PEQUENO PORTE**

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado no dia 03 de dezembro de 2013, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Os alunos foi arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Milton Luiz Polli  
Coordenador de Curso  
Departamento Acadêmico de Mecânica

---

Prof. Esp. Sérgio Moribe  
Responsável pela Atividade de Trabalho de Conclusão de Curso  
Departamento Acadêmico de Eletrônica

#### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues  
UTFPR

---

Prof. Msc. João de Almeida Gois  
UTFPR

---

Prof. Dr. Celso Salamon  
Orientador - UTFPR

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

## RESUMO

PEREIRA, Carlize T.; AZEVEDO, Gabriel S. de; ABREU, Thais F. ***Retrofitting do controle e implementação do quarto e quinto eixo em uma fresadora CNC de pequeno porte.*** 2013. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Mecatrônica Industrial) – Departamentos Acadêmicos de Eletrônica (DAELN) e Mecânica (DAMEC), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

O presente projeto propõe o desenvolvimento do controle CNC e implementação mecânica do quarto e quinto eixo em uma fresadora CNC de três eixos de trabalho. Dos eixos rotativos, foi utilizado o quarto eixo da fresadora Tormach PCNC 1100 e o quinto eixo foi projetado e desenvolvido pela equipe. Inicialmente, foi confeccionada uma bancada experimental de trabalho, composta por quatro eixos, sendo dois lineares e dois rotativos. Com este arranjo foram testados os movimentos de uma fresadora e diversas configurações de drives, interfaces e *softwares*. O computador de controle opera em ambiente Linux, utilizando o sistema operacional Ubuntu versão 10.04, no qual está instalado o EMC2. O EMC2 é o *software* CNC para controle de máquinas-ferramentas. Após o domínio do controle da bancada experimental, os dois eixos rotativos foram adicionados na fresadora Tormach PCNC 1100, de modo a obter-se um conjunto de cinco eixos de movimentação. A fresadora Tormach PCNC 1100 então, passou por adaptações em seu sistema de acionamento para permitir a implementação do controle dos novos eixos rotativos. Após estas alterações foram realizadas operações de usinagem em 5 eixos validando o projeto.

**Palavras-chave:** Fresadora cinco eixos. Controle de máquina-ferramenta. Controle numérico computadorizado.

## ABSTRACT

PEREIRA, Carlize T.; AZEVEDO, Gabriel S. de; ABREU, Thais F. **Control retrofitting and development of a fourth and fifth axis in a conventional milling machine.** 2013. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Mecatrônica Industrial) – Departamentos Acadêmicos de Eletrônica (DAELN) e Mecânica (DAMEC), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

This project proposes the development and implementation of CNC mechanical axis control of the fourth and fifth on a three-axis CNC milling machine. From all the rotary axis, it has been used the fourth axis of the milling machine Tormach PCNC 1100 and the fifth axis was designed and developed by the team. Initially, it was made an experimental workbench composed of four axes, two linear and two rotary. With this arrangement the movements of a mill and several configurations of drives, interfaces and software were tested. The control computer operates under Linux environment, using Ubuntu version 10.04 operating system, in which is installed EMC2. The EMC2 is the CNC software to control machine tools. After mastery of experimental bench, the two rotary axes were added in milling Tormach PCNC 1100, so as to obtain a set of five motion axis. The Tormach PCNC 1100 milling machine then, has suffered some adjustments in its drive system in order to allow control implementation of new rotary axes. After these changes machining operations were performed in 5 axes validating the project.

**Keywords:** Five-axis milling. Machine tool control. Computer Numerical Control.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de geometria complexa bipartida para possibilitar a usinagem em máquina CNC de três eixos.....	10
Figura 2 – Exemplos de diferentes disposições dos eixos rotativos em máquinas de cinco eixos.....	13
Figura 3 – Placa acionadora TB 6560.....	24
Figura 4 – Configuração portas e pinagem.....	24
Figura 5 – Eixos lineares da bancada experimental.....	25
Figura 6 – Eixos rotativos da bancada experimental.....	26
Figura 7 – Placa Breakout Board montada na primeira versão da placa amplificadora.....	27
Figura 8 – Motor de passo acoplado ao eixo Z da bancada experimental.....	28
Figura 9 – Sensores de emergência e <i>home</i> dos eixos lineares.....	29
Figura 10 – Sensores <i>home</i> dos eixos rotativos.....	30
Figura 11 – Ferramenta pneumática, utilizada como <i>spindle</i> , adaptada à bancada experimental.....	31
Figura 12 – Placa amplificadora com Breakout Board, fonte de 5VDC e adaptação para sinal dos sensores indutivos.....	32
Figura 13 – Código G inicial executado com caneta no lugar da ferramenta.....	34
Figura 14 – Usinagem do guarda chuva frontal, na bancada experimental.....	34
Figura 15 – Usinagem do contorno lateral, na bancada experimental.....	35
Figura 16 – Suporte do sensor <i>home</i> do eixo A.....	36
Figura 17 – Placa de comunicação intermediária utilizada para adaptação do controle da Fresadora Tormach PCNC1100.....	38
Figura 18 – Suporte da placa de comunicação intermediária.....	38
Figura 19 – <i>Driver</i> do quinto eixo adaptado no painel da fresadora.....	39
Figura 20 – Usinagem de furação em ângulo em aresta de cubo, fresadora Tormach.....	40
Figura 21 – Modelo utilizado para demonstração de geometria complexa.....	40
Figura 22 – Referenciamento da fresadora Tormach com auxílio de mandril.....	42
Figura 23 – Defeito de usinagem devido a problema de referenciamento.....	42
Figura 24 – Usinagem final em fresadora Tormach PCNC 1100 com cinco eixos....	43

## LISTA DE SIGLAS

A	<i>Ampère</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CI	Circuito Integrado
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DAELN	Departamento Acadêmico de Eletrônica
DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
DIP	<i>Dual In-line Package</i>
EMC2	<i>Enhanced Machine Controller</i>
LASIM	Laboratório de Automação e Sistemas Inteligentes da Manufatura
mm	Milímetro
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VAC	<i>Voltage Alternating Current</i>
VDC	<i>Voltage Direct Current</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
1.1	PROBLEMA	9
1.2	JUSTIFICATIVA	9
1.3	OBJETIVOS	11
1.3.1	Objetivo Geral	11
1.3.2	Objetivos Específicos	11
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>12</b>
2.1	FRESADORA	12
2.2	COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO	12
2.3	FRESADORA CINCO EIXOS	13
2.4	TORMACH QUATRO EIXOS	14
2.5	SENSORES	14
2.6	MOTORES DE ACIONAMENTO DOS EIXOS	15
2.7	<i>DRIVERS</i>	16
2.8	CIRCUITOS DE ACIONAMENTO	17
2.9	FUSOS	17
2.10	ACOPLAMENTOS	18
2.11	<i>SOFTWARE</i> CONTROLADOR	18
2.12	<i>SOFTWARE</i> MODELADOR	19
2.13	<i>SOFTWARE</i> CAM/PÓS-PROCESSADOR	19
<b>3</b>	<b>PLANEJAMENTO</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO, TESTES E VALIDAÇÃO</b>	<b>23</b>
4.1	PREPARAÇÃO DO COMPUTADOR DE CONTROLE	23
4.2	TESTES INICIAIS DE ACIONAMENTO	23
4.3	ESTRUTURA DA BANCADA EXPERIMENTAL E MONTAGEM DOS EIXOS	25
4.4	INSTALAÇÃO DE MOTORES E <i>DRIVERS</i>	26
4.5	INSTALAÇÃO DOS SENSORES	28
4.6	INSTALAÇÃO DA FERRAMENTA DE USINAGEM	30
4.7	USINAGEM NA BANCADA EXPERIMENTAL	31
4.8	MIGRAÇÃO PARA A FRESADORA TORMACH PCNC110	36
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>44</b>
	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>46</b>
	<b>APÊNDICE A – MANUAL DE CONFIGURAÇÃO EMC2</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE B – ESQUEMA ELÉTRICO DA PLACA AMPLIFICADORA</b>	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE C – ESQUEMA ELÉTRICO DA PLACA ADAPTADORA</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE D – PEÇAS MODELADAS</b>	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE E – CÓDIGO G FACEAMENTO – BANCADA EXPERIMENTAL</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE F – CÓDIGO G GUARDA-CHUVA – BANCADA EXPERIMENTAL</b>	<b>76</b>
	<b>APÊNDICE G – CÓDIGO G USINAGEM LATERAL – BANCADA EXPERIMENTAL</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Controle Numérico Computadorizado (CNC), para a automação dos processos de fabricação, veio a complementar as máquinas convencionais, devido à necessidade de se obter precisão, flexibilidade, repetibilidade e qualidade superior de acabamento, porém sem depender de qualificação do operador.

Uma das diferenças significativas entre o uso de máquinas operatrizes CNC das máquinas convencionais é a mudança de filosofia de atuação dos operadores. Nas máquinas convencionais, o operador tem a função de preparar a máquina, interpretar desenhos e fabricar a peça; já nas máquinas CNC, o operador posiciona as ferramentas no *magazine* da máquina preparada e, em seguida, transfere um programa de coordenadas e parâmetros de acordo com a peça a ser usinada, sendo este programa responsável pela parte automatizada do processo de usinagem.

Fresadora convencional é uma máquina ferramenta formada por uma estrutura mecânica, eixos de movimentação, *spindle* – conjunto responsável pelo controle de rotação da ferramenta através de um motor de alta velocidade – e ferramenta de corte. É capaz de transformar um material bruto em peças com alguma complexidade geométrica, através da combinação da rotação da fresa e o movimento linear da mesa, resultando na subtração de material do tarugo.

A automatização de uma fresadora convencional é feita através da implementação de conceitos CNC no controle dos movimentos lineares. Uma das características da máquina ferramenta é poder salvar e carregar os programas CNC mediante interface de comunicação, como por exemplo: disquete, cartões de memória, cabo RS- 232 e rede ethernet (Silva, 2005).

Na indústria de manufatura, a usinagem de modelos com geometria complexa é uma atividade amplamente utilizada, entretanto, dependendo da complexidade do modelo a ser usinado, máquinas de três eixos podem inviabilizar o processo. Uma possibilidade para a fabricação desses modelos é a utilização de fresadoras CNC com quatro ou mais eixos.

O presente documento detalha o estudo, montagem e configuração de uma bancada experimental baseada no princípio de funcionamento de uma fresadora CNC,

e posterior implementação do quarto e quinto eixo em uma fresadora CNC de pequeno porte, composta por três eixos de movimentação, bem como adaptação de controle. A bancada experimental foi desenvolvida com quatro eixos de movimentação com controle CNC, sendo dois eixos lineares e dois rotativos, para permitir a usinagem de geometrias complexas, otimizando o tempo de processo, devido à necessidade de apenas um *setup* de máquina. Já a fresadora Tormach PCNC 1100 dispunha, originalmente, de quatro eixos, três lineares e um rotativo removível. Nesta máquina foi adaptada a mesa bi-rotativa, desenvolvida na bancada experimental, além do novo sistema controle compatível com esta alteração.

## 1.1 Problema

Fresadoras CNC de três eixos são comumente utilizadas na indústria. No entanto, em ocasiões de usinagem de geometrias complexas, são incapazes de realizar todo o processo com apenas um *setup* de máquina. Neste caso, o ideal é a utilização de máquinas com mais eixos de trabalho, porém estas possuem um custo muito elevado e maior complexidade para integrar as tecnologias envolvidas.

Neste projeto são desenvolvidos e adaptados dois eixos rotativos de baixo custo, desenvolvidos em uma bancada experimental e, posteriormente, adaptados na Tormach PCNC 1100, em paralelo ao *retrofitting do controle*, considerando a disposição dos eixos e configuração dos sensores.

## 1.2 Justificativa

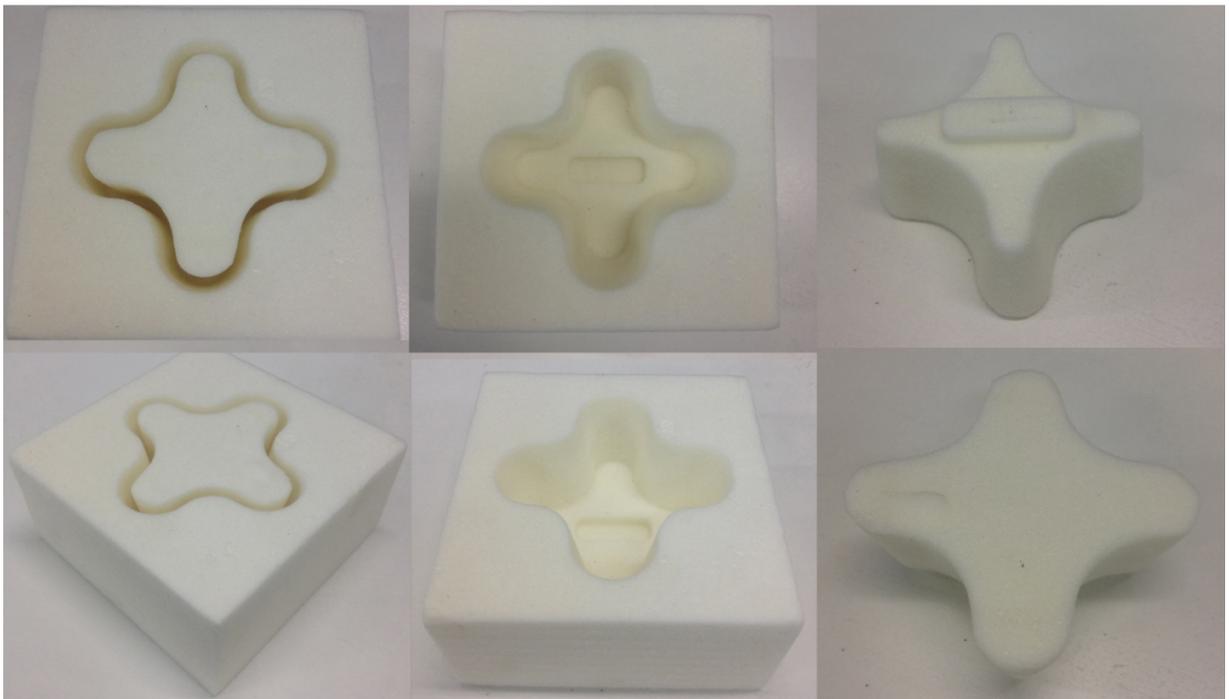
O processo de manufatura vem exigindo cada vez mais de seus equipamentos: rigidez, robustez e capacidade de usinar geometrias complexas.

As fresadoras CNC de três eixos conseguem suprir boa parte das exigências das indústrias, no entanto, para usinagem de geometrias complexas o processo pode se tornar inviável devido à necessidade de movimentar a peça de forma manual e

referenciá-la novamente, podendo haver redução na precisão da usinagem, bem como gerar tempo improdutivo durante um novo *setup*.

As fresadoras de cinco eixos, por conter dois eixos rotativos, facilitam a usinagem em três dimensões, possibilitando maior alcance na matéria-prima por parte da ferramenta, sem a necessidade de reposicionamento da peça na máquina para a conclusão do processo.

A Figura 1 exemplifica uma peça de geometria cônica, que para ser usinada de forma inteira necessitaria uma máquina com no mínimo dois eixos rotativos. No entanto, a peça foi fabricada em uma fresadora CNC de três eixos, sendo então necessário bipartir a geometria, usinando a partir de dois blocos distintos, para ser possível obter o perfil desejado.



**Figura 1 – Exemplo de geometria complexa bipartida para possibilitar a usinagem em máquina CNC de três eixos.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Neste projeto, além de se adaptar dois eixos rotativos em uma fresadora CNC de três eixos, também propõe-se a popularização da tecnologia utilizada na automação deste tipo de máquina, com mais de três eixos.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

Implementar em uma fresadora de três eixos, o quarto e quinto eixos de movimentação e adaptar o controle CNC, em ambiente Linux, utilizando o *software Enhanced Machine Controller (EMC2)* e os materiais mecânicos e de automação disponibilizados pelo Laboratório de Automação e Sistemas Inteligentes da Manufatura, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Projetar e desenvolver o quinto eixo compatível com quarto eixo já existente;
- Elaborar uma bancada experimental que proporcione um ambiente seguro para testes e aprimoramento do sistema de controle;
- Dimensionar e implementar a eletrônica de interface computador/máquina;
- Desenvolver o controle em ambiente Linux via *software EMC2*;
- Acionar a fresadora via computador;
- Usinar uma peça de geometria complexa que justifique a necessidade da utilização do sistema multieixos;
- Popularizar a tecnologia utilizada e conhecimento adquirido no desenvolvimento do trabalho.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Fresadora**

Fresadora é a máquina, desenvolvida por Eli Whitney em 1818, capaz de auxiliar no processo de fabricação de peças mecânicas através do processo de remoção de material do tarugo em forma de cavaco através da ferramenta fresa (Makina Erremintaren Museoa, 2011).

Para o processo de fresamento, a matéria-prima ou peça é fixada diretamente na mesa da máquina por uma morsa, grampos ou cabeçote divisor. A ferramenta é montada em um cabeçote e então, pode-se iniciar o processo de fresamento. A remoção de material se dá por movimentos contínuos da rotação da ferramenta e do avanço da mesa com a matéria-prima.

As combinações de fresas de diferentes formas conferem à máquina características especiais e, sobretudo, vantagens sobre outras máquinas-ferramenta. Uma das principais características da fresadora é a realização de uma grande variedade de trabalhos tridimensionais. O corte pode ser realizado em superfícies situadas em planos paralelos e perpendiculares.

### **2.2 Comando Numérico Computadorizado**

Segundo Machado (1987) e Silva (2005) o CNC é um sistema de controle que recebe informações de entrada de dados, compila e transmite em forma de comando para a máquina-ferramenta. Ao receber as informações a máquina-ferramenta executa a sequência programada, sem intervenção de um operador.

O CNC é o comando auxiliado por computador para realizar o processamento dos comandos de máquina. Máquinas ferramentas equipadas com o sistema CNC substituem as máquinas convencionais, devido à necessidade de fabricar peças em lote, obter produtividade, flexibilidade e qualidade superior de acabamento. Estes são os motivos que levaram a automatização do processo de fabricação em máquinas

ferramentas, bem como desenvolvimento de ferramentas de diversos materiais, permitindo a usinagem com rapidez.

### 2.3 Fresadora Cinco Eixos

Fresadora de cinco eixos é um equipamento mecânico utilizado para moldar peças complexas por possuir 5 graus de liberdade. Estas máquinas se referenciam em modelos tridimensionais que são gerados por computadores para que possam mecanicamente executar as ações em um objeto de determinado material, criando uma réplica do modelo digital que eles interpretam. Tanto a plataforma como a peça de trabalho são anexadas à ferramenta e são capazes de realizar um movimento automatizado, movendo-se de forma independente em ângulos diferentes para atingir os cortes necessários para fabricar um produto ou parte dele (Gouveia, 2012).

Utiliza-se o controle CNC em máquinas de cinco eixos para facilitar a usinagem de superfícies complexas através de um *software* de interface com a máquina, que realiza a leitura do código G, informando as coordenadas para determinada operação sem o reposicionamento da peça, ou seja, o operador referencia a máquina, peça e ferramenta apenas no início do processo.

As imagens da Figura 2 representam diferentes disposições dos eixos rotativos em máquinas de cinco eixos; onde a imagem A representa ambos os eixos rotativos dispostos na mesa (*table-table*), a imagem B representa um eixo rotativo na mesa e outro no cabeçote (*table-head*) e a imagem C ambos os eixos rotativos no cabeçote (*head-head*).

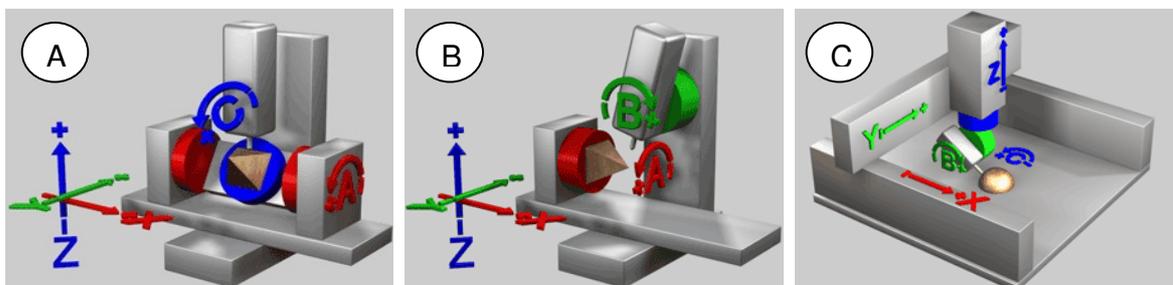


Figura 2 – Exemplos de diferentes disposições dos eixos rotativos em máquinas de cinco eixos

Fonte: CNC TOOLKIT, 2013.

## 2.4 Tormach Quatro Eixos

A Tormach PCNC 1100 é uma nova abordagem em máquinas de usinagem CNC, projetada para usinagens de peça de pequena dimensão (Tormach, 2012).

A Tormach, existente na UTFPR, disponibilizada no Laboratório de Automação e Sistemas Inteligentes da Manufatura (LASIM), contém o quarto eixo removível. No entanto, seu sistema de controle original é pouco eficaz, pela ausência de um sensor de posicionamento *home* para o quarto eixo. O sistema de controle da máquina se dá, originalmente, pelo *software* Mach3 (Mach3, 2011) através de um sistema de comunicação via porta paralela (DB25).

## 2.5 Sensores

Os quatro tipos de sensores mais comumente utilizados na indústria são:

- Sensores fim de curso;
- Sensores ópticos;
- Sensores capacitivos;
- Sensores indutivos.

Os sensores fim de curso têm o funcionamento fundamentalmente mecânico, sendo sensibilizados por contato físico. São amplamente utilizados devido ao baixo custo, porém, tem uma vida útil consideravelmente menor que outros tipos de sensores – em torno de um milhão de ciclos - que não necessitam de contato físico para o seu acionamento.

Já os sensores ópticos têm como princípio à emissão de um feixe de luz que, posteriormente, é recebido por um elemento fotossensível. Seu funcionamento acontece através da incidência ou interrupção do feixe luminoso sobre o foto-receptor, gerando assim comutação eletrônica do sinal sensorial. A vida útil deste tipo de sensor é pouco influenciada pela quantidade de ciclos ao qual é submetido, uma vez que ele não entra em contato com o objeto a ser detectado e não possui acionamentos mecânicos em seu encapsulamento.

Têm-se também os sensores capacitivos que são utilizados para detectar qualquer tipo de material. Funcionam, basicamente, de acordo com o princípio dos capacitores elétricos, que possuem por característica o aumento da sua capacitância quando se insere uma massa isolante entre seus eletrodos. Desta forma, quando um material se aproxima do sensor estará atuando como um material dielétrico aumentando a capacitância; por fim, o sistema eletrônico do sensor detecta esta variação na capacitância e atua no sinal do mesmo, comutando a saída. A vida útil desse tipo de sensor também é pouco influenciada pela quantidade de ciclos ao qual é submetido, já que não possui contato mecânico.

Como alternativa aos modelos anteriores, os sensores indutivos atuam detectando apenas materiais de natureza metálica e condutores de energia elétrica. Tal detecção se dá através da emissão de um campo eletromagnético sobre o espaço sensível do sensor. Quando o material especificado entra neste campo estará então absorvendo parte da força do campo tornando-o mais fraco, esta variação por sua vez é detectada pelo circuito eletrônico do sensor que atuará comutando a saída do mesmo (Thomazini, 2007).

## **2.6 Motores de Acionamento dos Eixos**

Fresadoras CNC necessitam de um preciso controle de movimentação. Tal situação pode ser suprida através da utilização de servomotores e/ou motores de passo; a escolha entre um deles depende de requisitos como: nível de precisão, velocidade de atuação e recursos financeiros disponíveis.

Segundo Kordik (2013), servomotor é um atuador rotativo que permite preciso controle de posição angular; consiste de um motor que possui um sensor de posição acoplado a uma caixa de redução ligada ao eixo motor. Necessita de um acionamento característico, sendo, então, necessária a utilização de *drivers* específicos para seu funcionamento.

Em termos de confiabilidade, através do *feedback* disponibilizado pelo sensor de posição do eixo do motor, acionamentos via servomotores proporcionam mais

segurança em situações que requerem maior confiabilidade na movimentação, aliados a alta performance de atuação, se comparados a motor de passo.

Motor de passo é um motor elétrico sem escova, acionado por corrente contínua que possui sua atuação rotativa dividida em passos de igual valor angular. O controle angular deste tipo de motor se dá pela alternância entre os pontos de travamento (passos). Uma das suas principais características é o funcionamento em malha aberta, ou seja, o *driver* envia o comando elétrico para a mudança de posicionamento, mas não recebe qualquer tipo de confirmação da execução desta ação.

Motores de passo não atingem a alta performance de atuação dos servomotores; tampouco trabalham no mesmo nível de confiabilidade, uma vez que não dispõem de um sensor de posicionamento angular; no entanto, tem seu custo de aquisição mais acessível, possibilitando, então, sua ampla aplicação em mecanismos onde o nível de precisão é diluído por meio de redutores e a possibilidade de perda de passo pode ser aceita em situações pré-determinadas.

## **2.7 Drivers**

No acionamento de motores, os *drivers* têm a função de receber o comando do controlador principal (CNC), potencializar esse comando e transmitir aos motores de acordo com o tipo de acionamento específico de cada motor. Tendo em vista que fresadoras utilizam-se, basicamente, de servomotores e/ou motor de passo para seu acionamento, e que cada motor utiliza um tipo específico *driver*, apenas *drivers* para motores de passo e servomotores poderão ser utilizados.

O *servodriver* atua no servomotor comparando a informação de posicionamento do eixo recebido do *encoder* com o posicionamento requisitado pelo controle principal (no caso da fresadora, o comando CNC) mantendo um contínuo ajuste sobre desvio angular, trabalhando, então, em malha fechada.

O *driver* para motor de passo caracteriza-se por trabalhar em malha aberta, recebendo do controlador principal as informações de pulso e direção e atuando no

motor de passo de acordo com tal comando, podendo também trabalhar com subdivisões de passo aumentando a precisão de posicionamento angular do eixo.

## 2.8 Circuitos de Acionamento

No acionamento de motores, onde a corrente de pico é de até 3,5A, pode-se utilizar placas acionadoras que dispõem dos Circuitos Integrados (CIs) Toshiba TB6560 (Toshiba, 2012), que são *drivers* de acionamento para motores de passo bipolares. A placa acionadora recebe sinais de pulso e direção do computador via porta paralela (DB25) e esses comandos são potencializados pelos CIs TB6560, de acordo com a configuração de micropasso e corrente máxima pré-programados e então, transmitidos para os motores.

No caso da necessidade de utilização de motores de passo onde a corrente de pico é maior ou igual a 3,5A, ou ainda, de servomotores, onde o comando de movimentação se dá via sinais de pulso e direção, existe a possibilidade de se utilizar placas de interface do tipo *breakout board* (BREAKOUT BOARD, 2011) que são desenvolvidas especificamente para acionamento de fresadoras. Essas placas promovem a amplificação/isolamento de sinal de entrada e saída entre o computador e os *drivers* de acionamento, além de sensores *home* e da emergência.

## 2.9 Fusos

Um fuso consiste de uma barra cilíndrica rosqueada acoplada a uma plataforma que possui a rosca fêmea. O movimento de rotação do fuso promove o deslocamento linear da plataforma.

Os fusos de esferas recirculantes têm por característica a utilização de esferas em sua transmissão. Estas esferas aliadas a um sistema de lubrificação garantem uma redução de perdas de rendimento (por atrito), possibilitando a implementação de pré-cargas em sua montagem que garantem a minimização das folgas de reversão (*backlash*).

Fusos trapezoidais possuem elevado coeficiente de atrito causando perda de rendimento; são recomendados para a utilização em sistemas que toleram *backlash*;

têm por característica o preço reduzido e menor complexidade de fabricação em relação aos fusos de esfera (Faires, 1960).

## 2.10 Acoplamentos

Acoplamentos são responsáveis por fazer a união de dois eixos, transmitindo o torque; em determinadas ocasiões, onde os eixos não são colineares, cabe ao acoplamento compensar este desalinhamento, minimizando cargas axiais indesejadas.

Os acoplamentos rígidos são recomendados nos casos onde a montagem dos eixos garante perfeita colinearidade entre eles, não havendo desalinhamento a ser compensado. Em casos onde existe desalinhamento entre os eixos pode ser mecanicamente impossível a montagem de um acoplamento rígido.

Acoplamentos helicoidais são usinados em forma espiralada, dando flexibilidade ao elemento de união, gerando assim capacidade de compensar pequenos desalinhamentos entre os eixos (podendo ser desalinhamento de paralelismo e/ou angulares), além de amenizar vibrações.

Os acoplamentos elásticos possuem características semelhantes às dos acoplamentos helicoidais, tanto ao compensar desalinhamentos quanto na função de amenização de vibrações (Costa, 2011).

## 2.11 Software Controlador

*Softwares* controladores de máquinas CNC são responsáveis pela leitura do código de máquina (código G) e processamento dos comandos necessários para execução do mesmo, tais como: acionamento de motores e do *spindle*, leitura dos sensores, troca de ferramentas e sistema de refrigeração.

O *software* Mach3, executável em plataforma Windows, disponibiliza uma licença demonstrativa gratuita; porém, sua licença completa é paga; sua comunicação com a máquina se dá via porta paralela DB25, enviando os sinais de pulso e direção para controle dos acionamentos, além de receber sinais dos sensores de *home* e/ou emergência (Mach3, 2011).

Como opção de licença gratuita existe o *software* EMC2, em plataforma Linux, possuindo características de controle e acionamento similares ao *software* Mach3;

porém, com interface menos amigável e de mais complexa configuração (Linux CNC, 2011).

### **2.12 Software Modelador**

Nos *softwares Computer Aided Design (CAD)* modeladores são elaborados os projetos de geometrias em 3D, onde é possível visualizar o desenho final da peça, criando um arquivo digital da mesma, este arquivo pode ser utilizado posteriormente pelo *software* pós-processador para gerar o código G.

O SolidWorks (SolidWorks, 2012) é um *software* CAD modelador pago, amplamente utilizado na indústria e que possui interface amigável. Este *software* tem como fundamento o método de computação paramétrica, onde a partir de formas geométricas mais simples (esboços 2D e/ou 3D) é possível desenvolver componentes tridimensionais.

### **2.13 Software CAM/Pós-Processador**

*Softwares Computer Aided Manufacturing (CAM)* têm por função essencial o desenvolvimento de uma estratégia de usinagem, à partir de um modelamento matemático e posterior criação do código de máquina que contém as coordenadas necessárias para o processo de usinagem.

PowerMILL (PowerMILL, 2012) é um exemplo de *software* CAM/pós-processador capaz de desenvolver as coordenadas de usinagem a partir de um arquivo digital da peça em 3D importado de um *software* modelador, com base nas estratégias de usinagem pré-selecionadas pelo usuário. É um *software* pago com capacidade de explorar as mais diversas funcionalidades de máquinas fresadoras, inclusive das multieixos.

Conforme em CNC Toolkit (2012), o Gmax é um *software* modelador, não industrial, gratuito e de interface amigável que dispõe da possibilidade de incorporar *scripts* em suas ferramentas disponíveis; o Toolkit é um *script* desenvolvido para o Gmax com a funcionalidade de desenvolver códigos de máquina para usinagem de geometrias processadas no Gmax.

### 3 PLANEJAMENTO

Foi construída uma bancada experimental para testes, simulações iniciais e aprimoramento do sistema de controle; a bancada teve resistência mecânica limitada, para absorver possíveis impactos ocorridos devido aos erros de acionamento. Na bancada foram simulados quatro eixos de movimentação, sendo, inicialmente, definidos como dois lineares e dois rotativos.

Para acionamento da bancada foram selecionados os seguintes componentes:

- Motores de passo e *driver*: Os motores foram selecionados devido à sua pré-disponibilidade no LASIM, bem como seus *drivers* de acionamento;
- Placa interfaceadora *Breakout Board*: foi selecionada por seu baixo custo e possibilidade de controle e acionamento de cinco eixos simultâneos, além de possuir entrada para sensores;
- Placa acionadora *Toshiba TB6560*: foi selecionada devido à disponibilidade no LASIM, para testes iniciais de controle, durante tempo necessário até a aquisição da placa *Breakout Board*;
- Sensores fim de curso: foram selecionados, para os eixos lineares, devido ao baixo custo e por apresentarem precisão compatível com a aplicação;
- Sensores indutivos: foram selecionados, para os eixos rotativos, devido à disponibilidade no LASIM e impossibilidade mecânica de utilização de sensores fim de curso para tais eixos;
- Fonte chaveada 5VDC: necessária na alimentação da *Breakout Board*;
- Fonte 24VDC: Necessária para acionamento do *drivers* disponibilizados, OEM 750 (Parker, 2011) e *driver* Leadshine MD2278 (Leadshine, 2011).

Para a mecânica da bancada experimental foram selecionados:

- Perfis estruturais comerciais de alumínio: foram selecionados para estrutura básica da bancada, devido ao fácil manuseio e pré-disponibilidade no departamento de mecânica;

- Eixos lineares e fusos de esfera: a estrutura dos eixos lineares foram disponibilizadas pelo LASIM, reaproveitadas de outra máquina didática. Estas estruturas já possuíam, incorporados, os fusos de esfera. Estes foram mantidos devido à sua eficiência em termos de rendimento e precisão;
- Primeiro eixo rotativo: A estrutura foi aproveitada da fresadora Tormach PCNC 1100;
- Segundo eixo rotativo: A estrutura fabricada em alumínio, de acordo com dimensões do motor;
- Castanha: A castanha utilizada para fixação do material usinado foi disponibilizada pelo LASIM, e acoplada diretamente no motor do segundo eixo rotativo;
- *Spindle*: Foi disponibilizada pelo LASIM uma retífica pneumática que foi adaptada como *spindle*;
- Fixação *spindle*: Uma peça para adaptação do *spindle*, ao eixo linear Z, foi desenvolvida e implementada;
- Fixação sensor: As adaptações para a fixação dos sensores foram projetadas e implementadas de acordo com a necessidade de cada aplicação;
- Acoplamentos helicoidais: foram selecionados devido à possibilidade de compensação de desalinhamento entre os eixos, bem como a pré disponibilidade no LASIM;
- *Renshape* (Volpato, 2012): Foi selecionado como material de usinagem devido à fácil usinabilidade, para suprir baixa rigidez da bancada experimental e compensar possíveis erros de comando.

Os *softwares* utilizados:

- *Software* de controle e acionamento: Utilizado, inicialmente, o Mach3, para ambientação ao sistema de comunicação via porta paralela, devido à sua interface amigável e compatibilidade com ambiente Windows. Após domínio sistema de comunicação, o controle foi migrado para o EMC2, *software* de licença gratuita e código aberto, inicialmente proposto para o projeto;

- *Software* de modelamento: Utilização do Solidworks devido à familiaridade dos integrantes da equipe com *software* e este possuir licença disponível na universidade;
- *Software* pós-processador: Utilização do Gmax com ferramenta Toolkit, por ter licença gratuita e ter capacidade de gerar código de ferramenta para máquinas multieixos.

Após implementação e testes do controle da bancada experimental, foi feita a migração dos eixos rotativos para a fresadora Tormach PCNC 1100. O controle da Tormach foi adaptado para o acionamento do quinto eixo e os sensores adicionais, sendo necessário o desenvolvimento de uma placa de acionamento complementar para interface com *hardwares* adicionais.

## 4 IMPLEMENTAÇÃO, TESTES E VALIDAÇÃO

### 4.1 Preparação do Computador de Controle

Para realizar o controle da bancada experimental e, posteriormente, da fresadora Tormach PCNC 1100, foi necessário preparar um computador com dois sistemas operacionais; o Windows para o *software* Mach3 e Linux para o EMC2.

O computador utilizado foi disponibilizado pelo LASIM, já possuindo porta paralela em sua placa mãe e sistema operacional Windows XP, no qual foi instalada a versão *demo* com licença gratuita do *software* de controle Mach3. Em uma nova partição do disco rígido foi instalado o Linux Ubuntu (Ubuntu, 2011), adquirido na página [www.linuxcnc.org](http://www.linuxcnc.org) já contendo o *software* controlador o EMC2.

### 4.2 Testes Iniciais de Acionamento

Adquiriu-se via *site* [www.aliexpress.com](http://www.aliexpress.com), uma *5 Axis Breakout Board*, placa interfaceadora capaz de intermediar a comunicação - via porta paralela - entre o computador e os periféricos da máquina, como os sensores e os *drivers* de acionamento dos motores. Durante o tempo necessário para a entrega da placa interfaceadora, para ambientar-se à pinagem e o funcionamento da comunicação via porta paralela, utilizou-se o *software* Mach3, em ambiente Windows, para comunicação com uma placa acionadora de quatro eixos, exibida na Figura 3, que utiliza os CIs Toshiba TB6560. Esta placa possui a capacidade de acionar motores de passo que exigem uma corrente de pico de até 3,5A.

A placa acionadora Toshiba TB6560 foi conectada ao computador via porta paralela e alimentada com uma fonte 12VDC; à placa foram conectados dois motores de passo com corrente de pico de aproximadamente 2A+ estes foram ligados às saídas dos eixos X e Y.

No *software* Mach3 foi necessário configurar os pinos da porta paralela, referentes aos sinais de pulso e direção dos motores (Figura 4) de acordo com configuração da placa.



Figura 3 – Placa acionadora TB 6560

Fonte: Autoria Própria.

Os testes de comunicação entre *software* Mach3 e placa acionadora se mostraram satisfatórios, pois ajudou a esclarecer o funcionamento do sistema de configuração de pulso e direção para os motores via porta paralela.

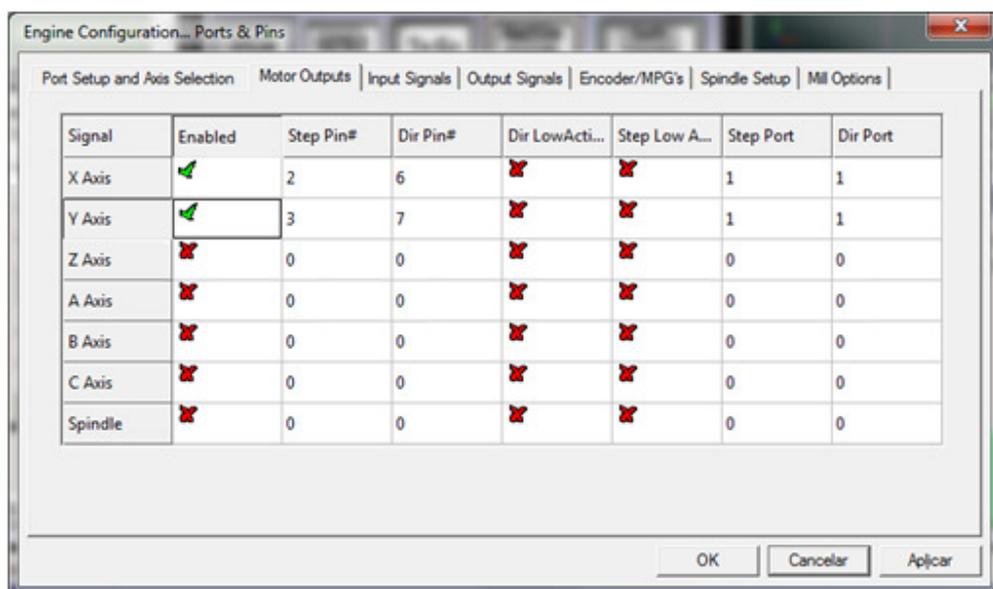


Figura 4 – Configuração portas e pinagem

Fonte: Autoria Própria.

### 4.3 Estrutura da Bancada Experimental e Montagem dos Eixos

A estrutura fundamental da bancada experimental foi montada com guias de alumínio, unidas por junções específicas para o tipo de guia utilizado. A disposição dos guias deu-se de acordo com comprimento dos eixos lineares disponíveis. Sobre a estrutura foi fixado o primeiro eixo linear, eixo Y da bancada, e sobre este o segundo eixo linear, referente ao eixo Z (eixo que movimentava a ferramenta em seu sentido axial). Após a montagem dos eixos lineares sobre a estrutura fundamental, foi necessário fazer alinhamentos destes, de modo a garantir a precisão de usinagem. A Figura 5 exibe os eixos lineares montados sobre a estrutura de alumínio.



**Figura 5 – Eixos lineares da bancada experimental**

**Fonte: Autoria Própria.**

O primeiro eixo rotativo, eixo A, foi então, removido da fresadora Tormach PCNC 1100 e anexado à base de alumínio da bancada experimental. Sobre a estrutura do eixo A foi fixado o segundo eixo rotativo, eixo C, sendo necessário o projeto e desenvolvimento de uma base em L, para comportar o motor responsável pelo movimento de tal eixo. Sendo o eixo C responsável pela movimentação direta da peça, foi adaptada a ele uma castanha, com a função de fixação do material a ser usinado. A Figura 6 exibe os eixos rotativos adicionados à bancada experimental.



Figura 6 – Eixos rotativos da bancada experimental

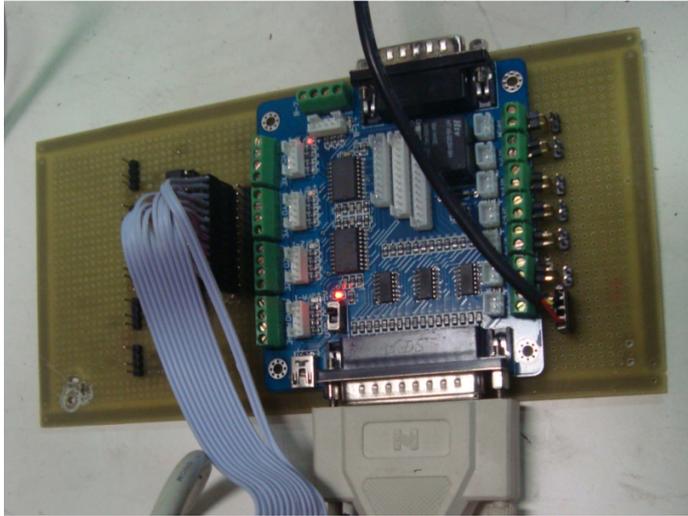
Fonte: Autoria Própria.

#### 4.4 Instalação de Motores e *Drivers*

Os motores não foram inicialmente acoplados aos eixos da bancada experimental, pois concluiu-se que seria necessário, antes da montagem, efetuar testes de acionamento dos mesmos, configurando nos *drivers* a relação de passos por deslocamento, evitando assim movimentos inesperados dos eixos após o acoplamento.

Ainda no *software* Mach3, utilizando a placa amplificadora Breakout Board, verificou-se que o *driver* Leadshine MD2278 não se comportou de acordo com os comandos de pulso e direção, recebidos da placa. As entradas de sinal do *driver* foram, então, testadas manualmente através de chaves DIP e resistores *pull-down*, e o *driver* se comportou de acordo com os comandos; concluiu-se que a impedância de entrada do *driver* era baixa, e a corrente fornecida pelo sinal da Breakout Board não era suficiente para sensibilizar tais entradas.

Para ser possível o acionamento do *driver*, projetou-se uma placa amplificadora dos sinais da Breakout Board, utilizando o CI buffer 74LS245, com capacidade de fornecer corrente de até 25mA, a qual se mostrou suficiente para sensibilizar as entradas do *driver*. Na placa também foram adaptados *bornes* para facilitar a conexão dos cabos dos sensores e motores, como exibido na Figura 7.



**Figura 7 – Placa Breakout Board montada na primeira versão da placa amplificadora**

**Fonte: Autoria Própria.**

Em seguida, configurou-se o *software* EMC2, de acordo com o manual no Apêndice A, para prosseguir com testes de motor, ainda fora da bancada. Gerou-se um código G para acionamento dos motores, inicialmente de forma sequencial (um motor após o outro). Como os resultados obtidos foram satisfatórios, em sequência, modificou-se o código G para acionamento simultâneo dos motores, promovendo aceleração e desaceleração dos mesmos, além de reversão de rotação. Também neste segundo teste, a movimentação dos motores comportou-se de acordo com o esperado.

Partiu-se, então, para a integração dos motores nos eixos da bancada experimental, onde estes foram mecanicamente conectados aos fusos lineares através de acoplamentos, conforme Figura 8. Ao executar novos testes de acionamento, percebeu-se que o eixo de um dos motores patinava no acoplamento quanto se exigia maior torque; como o aperto do acoplamento no eixo do motor já estava no final de seu curso, foi então necessária a adaptação uma chapa metálica em torno do eixo do motor (bucha), a fim de melhorar o ajuste com o acoplamento, resolvendo o problema.

As divisões de passo dos *drivers* foram configuradas de acordo com a capacidade da bancada experimental, a fim de refinar a precisão de movimentação dos eixos. Os parâmetros do EMC2 foram então atualizados com tais configurações dos *drivers*, bem como o limite de curso dos eixos.



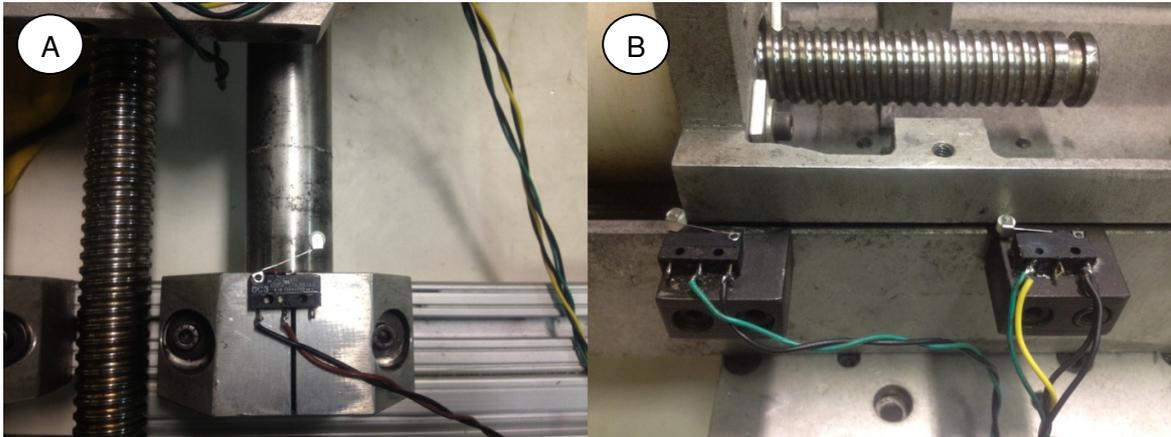
Figura 8 – Motor de passo acoplado ao eixo Z da bancada experimental

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.5 Instalação dos Sensores

Foi configurada, no EMC2, a interpretação de um sensor fim de curso como emergência; ao colocar o sistema em funcionamento e acionar tal sensor manualmente, a operação foi abortada e o aviso de "emergência acionada" foi exibido na tela do EMC2. Após a conclusão do teste foi decidido que seria colocado nos eixos lineares, além dos sensores de *home*, também sensores de emergência para limitar seu curso final; este sensor de emergência atua como medida de segurança nos casos onde os eixos não tenham sido corretamente zerados.

Ambos os eixos lineares receberam um par de sensores, sendo um de *home* e outro de emergência; estes foram fixados à estrutura com Cianocrilato após a análise de melhor posição para cada um, de acordo com sua função. A Figura 9 exibe na Imagem A, o sensor de *home* do eixo Y com contato NA; a Imagem B exibe o sensor de *home* do eixo Z com contato NA (à direita) e sensor de emergência NF (à esquerda), para limitar o curso máximo deste eixo.

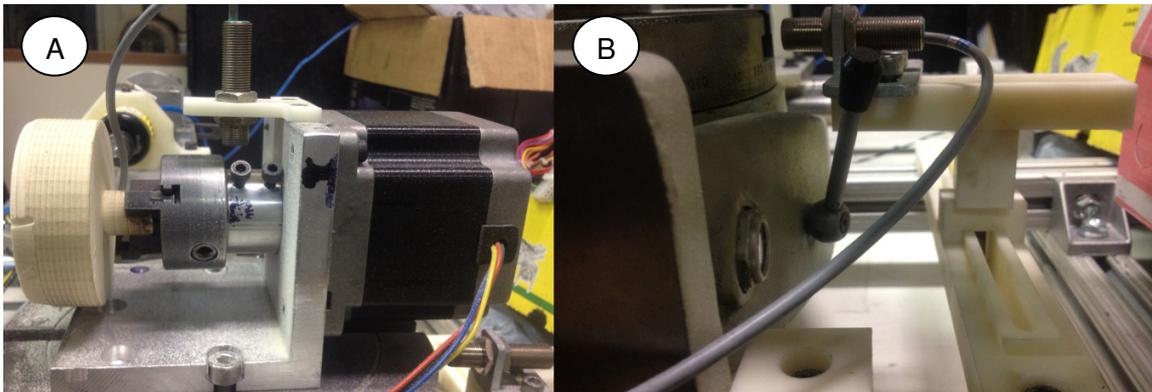


**Figura 9 – Sensores de emergência e *home* dos eixos lineares**

**Fonte: Autoria Própria.**

Em ambos os eixos rotativos foram utilizados sensores indutivos, devido à impossibilidade de utilização de sensores fim de curso, já que a movimentação de tais eixos é de forma angular para os sentidos positivo e negativo, o que danificaria um sensor fim de curso. Para a fixação do sensor de *home* do eixo A foi projetado um suporte ajustável, com possibilidade de ajuste fino da posição zero deste eixo. A fixação do sensor *home* do eixo C também foi desenvolvida de acordo com o melhor ponto para o posicionamento do sensor, a fim de não comprometer a mobilidade do eixo. A fixação dos sensores é exibida na Figura 10, sendo a Imagem A o sensor do eixo C e a Imagem B o sensor do eixo A em seu suporte ajustável. Sensores de emergência, para os eixos rotativos, foram considerados não adequados, pois ao completar, no máximo, uma revolução, o sensor seria acionado, abortando o processo.

Na Breakout Board, a entrada de sinal *home* é digital e negada. Como os sensores indutivos utilizados são do tipo PNP e têm tensão de saída de sinal 24VDC, foi necessário uma adaptação eletrônica com resistores para regular esta diferença de tensão, além da inversão da leitura do sinal do sensor no *software* controlador EMC2 para contornar a inversão de polaridade do sinal enviado pelo sensor indutivo.



**Figura 10 – Sensores *home* dos eixos rotativos**

**Fonte: Autoria Própria.**

O curso do eixo A foi limitado no *software* EMC2 de  $180^\circ$  à  $-180^\circ$ , a partir da posição *home*, sendo esta exatamente aonde o eixo da castanha é colinear com o eixo Z; tal definição se dá devido à necessidade de limitar a torção dos cabos do motor e do sensor *home* do eixo C. Foi configurado, também, o eixo C para movimentar-se de  $180^\circ$  à  $-180^\circ$  e os cursos dos eixos lineares de acordo com as limitações físicas da bancada, sendo: o eixo Z de 0 à 90mm e o eixo Y de -122mm à 78mm, onde o *software* procura o sensor *home* na posição -122mm e movimenta-se até 0mm, onde o eixo Z fica colinear com a castanha.

No *software* de controle EMC2, configurou-se também a ordem de *home* dos eixos, de modo a evitar possíveis colisões. Ficou definido que primeiramente se deve zerar o eixo Z, afastando a ferramenta da castanha; em seguida, zera-se o eixo Y, no qual está fixado todo o conjunto que compõe o eixo Z, e então zeram-se os dois eixos rotativos; primeiro o eixo A e então o eixo C.

#### **4.6 Instalação da Ferramenta de Usinagem**

Na bancada experimental, o *spindle* foi adaptado. Utilizou-se uma retífica pneumática com uma fresa de topo, de diâmetro 3mm, fixada à estrutura do eixo Z, por um suporte especialmente projetado, de forma que não comprometesse a qualidade de movimentação e usinagem.

Como a retífica se tratava de uma ferramenta pneumática, foi necessária a instalação de uma rede de ar comprimido, uma válvula pneumática reguladora de fluxo, para controlar a velocidade de corte através da intensidade do fluxo de ar, e uma válvula de esfera, tipo alavanca, para abrir/fechar o fluxo. A alavanca de acionamento da retífica foi substituída por uma abraçadeira, de modo a manter a retífica sempre ligada, como exibido na Figura 11.

Ao montar a retífica à estrutura da bancada experimental, notou-se que o centro da ferramenta não ficou verticalmente coincidente com o eixo da castanha, sendo assim necessário um ajuste fino no componente responsável pela fixação da ferramenta pneumática.

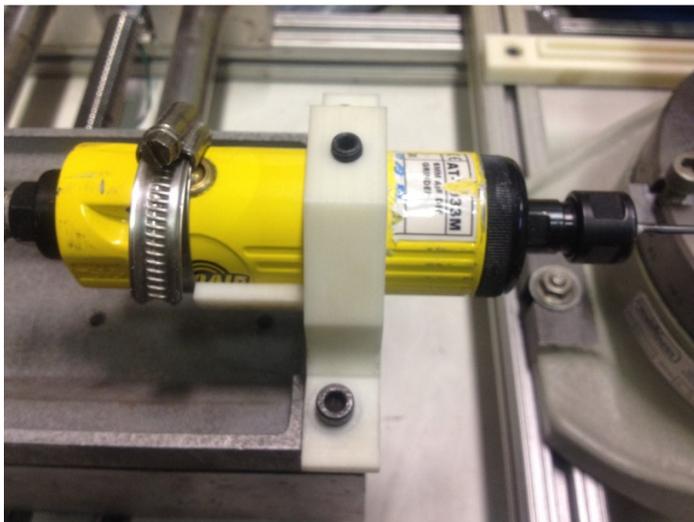


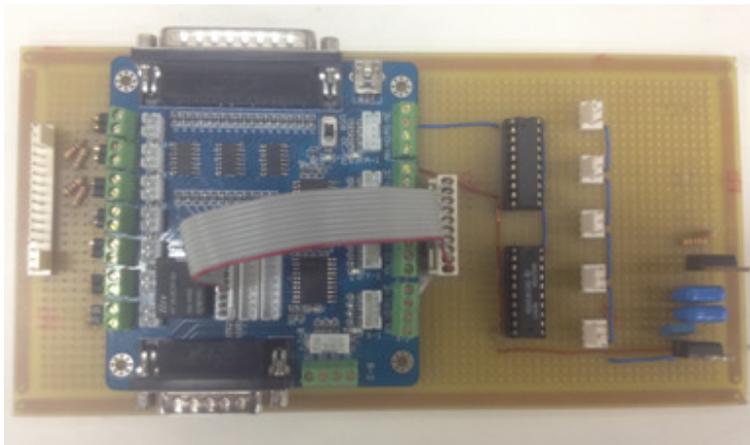
Figura 11 – Ferramenta pneumática, utilizada como *spindle*, adaptada à bancada experimental.

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.7 Usinagem na Bancada Experimental

Anteriormente à aquisição da fresa de topo diâmetro 3mm, foi utilizada uma ferramenta de desbaste de óxido de alumínio, cônica, para testes de usinagem em um tarugo de *renshape*. Com o código G desenvolvido manualmente, fez-se um chanfro espaçado em umas das arestas circulares do tarugo, para verificar o comportamento da máquina durante a execução do código G.

Com a fresa de topo, realizou-se o faceamento. Durante o teste ocorreu problema de superaquecimento de um dos *drivers*, proveniente do não funcionamento do *cooler* interno, o que foi resolvido com sua substituição. Na sequência, verificou-se ruídos nos sinais dos sensores, sendo feita a substituição do cabeamento, conectorização e também dos sensores, o que não resolveu o problema. Recorreu-se, então, à utilização de um osciloscópio e com este pôde-se verificar que a qualidade do sinal 5VDC fornecido pela fonte chaveada não era de boa qualidade. Identificado o problema, foi montada uma fonte linear, a partir da tensão 24VDC disponível na fonte de alimentação dos *drivers* OEM750, utilizando um IRF540 para reduzir a tensão para 12VDC e, então, alimentar o CI LM7805 que fornece 5VDC. Alimentando a placa amplificadora, bem como a Breakout Board e os sensores fim de curso com a tensão 5VDC da nova fonte linear, exibidos na Figura 12, cessou-se os ruídos.



**Figura 12 – Placa amplificadora com Breakout Board, fonte de 5VDC e adaptação para sinal dos sensores indutivos**

**Fonte: Aatoria Própria.**

Várias estratégias de usinagem foram testadas para determinar uma melhor qualidade do faceamento. Identificou-se que se o eixo C fizesse várias revoluções (ao invés de apenas movimentar-se entre  $180^\circ$  e  $-180^\circ$ ), a superfície da peça ficaria com melhor qualidade; sendo assim foram reconfiguradas as limitações do trajeto de tal eixo.

Considerando o alto nível de dificuldade encontrado para gerar manualmente o código G de uma peça com geometria complexa, tentou-se gerá-lo de um desenho

planificado de um guarda chuva no Gmax, utilizando um desenho modelado no SolidWorks. Porém, o Gmax não oferece suporte a nenhum tipo de extensão de arquivo gerado pelo SolidWorks. Modelando o mesmo desenho no Gmax, ao habilitar o *script* Toolkit não foi possível gerar o código G, pois a versão utilizada não possuía os comandos necessários para concluir tal operação, e versões anteriores do ToolKit não estavam mais disponíveis para *download*.

Prosseguiu-se, então, para a elaboração do código G do guarda chuva frontal utilizando o modelo matemático da bancada experimental no *software* SolidWorks, o código foi confeccionado com o auxílio do recurso Esboco3D. O modelamento continha uma representação geometricamente simplificada dos componentes envolvidos no processo de usinagem, como exibido no Apêndice I; porém, as medidas essenciais destes componentes eram fieis às da bancada experimental. Também estava representado o tarugo a ser usinado, em sua geometria final. O projeto da peça a ser usinada foi desenvolvido possuindo uma malha em sua superfície com pontos espaçados a cada milímetro; estes pontos eram colocados coincidentes com a ponta da ferramenta no modelamento matemático da bancada, obtendo-se, assim, o posicionamento absoluto de cada um dos quatro eixos da bancada experimental para cada ponto. O conjunto de todos os pontos formou o código G do guarda chuva frontal.

Com o código G gerado, partiu-se para a usinagem do tarugo na bancada experimental, substituindo a ferramenta por uma caneta e verificou-se que havia um erro na parte do código correspondente ao cabo do guarda chuva, exibido na Figura 13. O erro estava na tomada de medidas da montagem do conjunto no SolidWorks. Ao corrigir o erro, foi realizada, então, uma nova simulação com uma caneta e o resultado obtido foi satisfatório. Usinando com a fresa de topo de 3mm, com avanço de 0,5mm, obteve-se o perfil desejado, exceto por uma marca resultante de um erro de digitação no posicionamento do eixo Z em uma das linhas do código, que fez com que a ferramenta avançasse um 1mm a mais do que o desejado neste ponto, como mostra a Figura 14.



**Figura 13 – Código G inicial executado com caneta no lugar da ferramenta**

**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura 14 – Usinagem do guarda chuva frontal, na bancada experimental**

**Fonte: Autoria Própria.**

Após a conclusão da usinagem frontal, para comprovar a utilidade de uma mesa bi-rotativa no processo de usinagem, foi desenvolvido um contorno lateral em ângulo, que, para sua execução, seria necessária a movimentação simultânea dos

quatro eixos da bancada experimental. O código G deste processo também foi desenvolvido no SolidWorks, com o auxílio do modelamento matemático da bancada.

Na usinagem do contorno lateral, o grau de liberdade do eixo C, em paralelo com a movimentação simultânea dos demais eixos, foi o que possibilitou a entrada, em ângulo, da ferramenta na peça. Este posicionamento só é obtido quando dois ou mais eixos rotativos atuam em conjunto com os demais eixos lineares.

Durante a execução do percurso, logo no início foi verificado que alguns ruídos ainda atuavam no sistema de controle, pois eram visíveis algumas falhas rápidas de funcionamento. Como as falhas eram pouco significativas na usinagem final (perdia-se poucos pulsos de movimentação dos passos dos motores), prosseguiu-se com a usinagem até que em determinado ponto a falha de movimentação foi grande, causando uma marca profunda no tarugo. Não houve dano à ferramenta ou a qualquer um dos eixos de movimentação da bancada, já que o *renshape* que vinha sendo utilizado como material de usinagem era de fácil usinabilidade. Após o incidente, verificou-se que a solução seria a substituição dos atuais conectores utilizados nos cabos de comunicação entre a placa interfaceadora e os *drivers* de acionamento dos motores, que eram do tipo “barra de pinos”, por conectores tipo “kk” que garantem uma conexão mais rígida e confiável. Feita a substituição dos conectores, foi dado continuidade ao processo de usinagem, que, daí em diante, prosseguiu de forma satisfatória, conforme Figura 15.



**Figura 15 – Usinagem do contorno lateral, na bancada experimental**

**Fonte: Autoria Própria.**

#### 4.8 Migração para a Fresadora Tormach PCNC110

Para a realização das usinagens citadas até então, diversas intervenções na bancada experimental – tanto da parte de mecânica, quanto eletrônica/acionamento e *software* – se fizeram necessárias; de modo que, ao final da usinagem do guarda chuva frontal e contorno lateral, verificou-se que a bancada experimental estava funcional, não apresentando quaisquer problemas de funcionamento, mesmo quando submetida a longos períodos de trabalho ininterrupto. Concluiu-se, então, que poderia ser iniciada a migração do sistema para a fresadora Tormach PCNC1100.

Os eixos rotativos foram removidos da bancada experimental e implementados à mesa XY da fresadora, bem como seus *drivers* de acionamento e o conjunto de sensores. Para o sensor *home* do eixo A, foi necessário projetar um novo suporte, como exibido na Figura 16, já que antigo não era ajustável à nova estrutura.

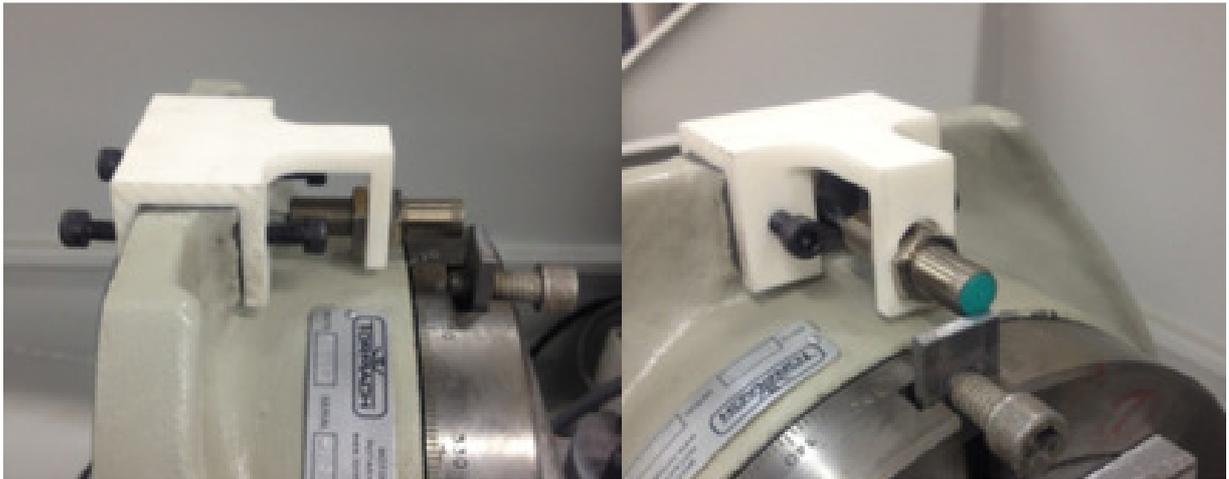


Figura 16 – Suporte do sensor *home* do eixo A

Fonte: Autoria Própria.

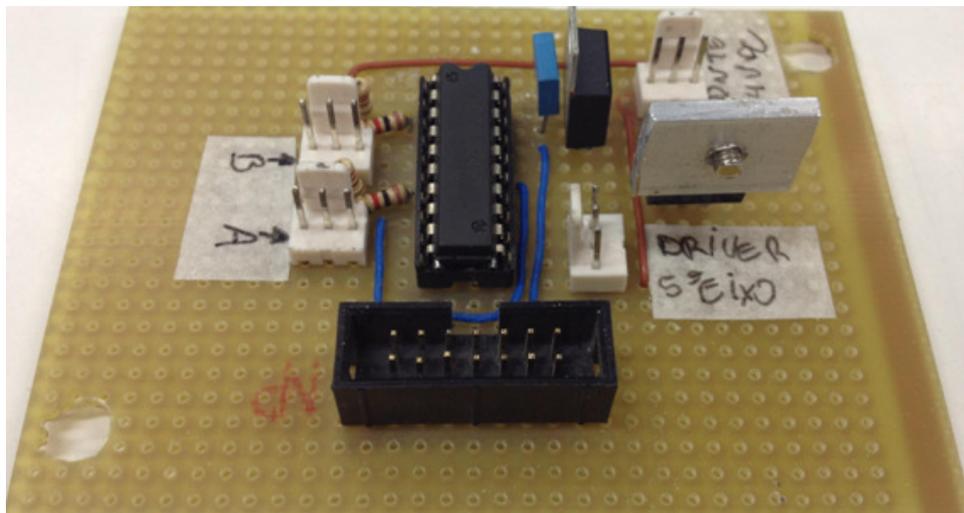
A Fresadora Tormach PCNC 1100 já vem de fábrica com o sistema de acionamento do quarto eixo, mas não com um sensor de *home* para este, bem como não possui nenhum sistema de controle/acionamento para o quinto eixo. Sendo assim, após a análise no painel de controle da fresadora, verificou-se que seria possível a utilização do sistema de acionamento original da máquina, fazendo-se apenas algumas

adaptações em seu painel. Foi construída uma placa de comunicação intermediária entre o painel da fresadora e o computador. Para esta placa se desviam as vias de comunicação dos sinais de controle do quinto eixo e as vias referentes a sensores de *home* do quarto e quinto eixos.

A placa de comunicação intermediária recebe o cabo de dados do computador e desvia as vias relativas ao controle do quinto eixo e sinal dos sensores *home* do quarto e quinto eixo. As demais vias são conectadas diretamente na placa de controle do painel da Fresadora Tormach PCNC1100.

Os sensores utilizados para identificação da posição de *home* dos eixos rotativos são os mesmos sensores indutivos utilizados na bancada experimental. Sendo assim, também foi necessário adaptar o circuito para se promover a queda de tensão utilizando resistores R3 e R4, conforme Apêndice C. O circuito integrado *buffer* 74LS245 foi utilizado para amplificar e isolar os sinais de pulso e direção enviados pelo computador ao *driver* do quinto eixo e, também, os sinais dos sensores *home* do quarto e quinto eixo.

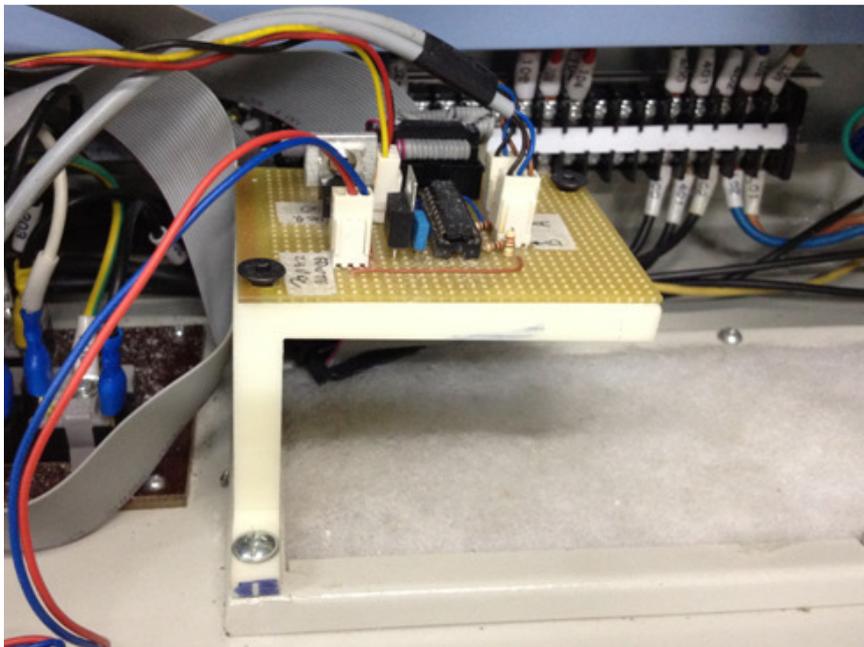
A placa de comunicação intermediária é alimentada por uma fonte de 24VDC, adaptada de um CLP Omron. A tensão 24VDC é utilizada na placa para alimentar os sensores indutivos. Para a alimentação do *buffer*, utilizou-se um Mosfet IRF540, provendo neste uma queda de tensão de 12VDC, e, em série, um CI regulador de tensão LM7805, que tem como saída a tensão necessária para alimentação do *buffer* de 5VDC. A placa pode ser visualizada na Figura 17.



**Figura 17 – Placa de comunicação intermediária utilizada para adaptação do controle da Fresadora Tormach PCNC1100**

**Fonte: A autoria Própria.**

A montagem da placa de comunicação intermediária foi feita de acordo com o Apêndice C, onde o conector CN1 recebe a tensão 24VDC da fonte de alimentação. Os conectores CN2 e CN3 conectam os sensores de *home* do quarto e quinto eixo, respectivamente. O conector CN4 envia os sinais de pulso e direção para o *driver* do quinto eixo e o conector CN5, por sua vez, recebe sinais da placa de controle da Fresadora Tormach PCNC 1100 e da porta paralela do computador. Para a fixação da placa no interior do painel da Fresadora Tormach PCNC 1100, foi desenvolvido um suporte em *renshape* acoplado à base do painel, de acordo com a Figura 18. No interior do painel da fresadora foi necessária, também, uma adaptação para a fixação do *driver* do quinto eixo conforme Figura 19.



**Figura 18 – Suporte da placa de comunicação intermediária**

**Fonte: A autoria Própria.**



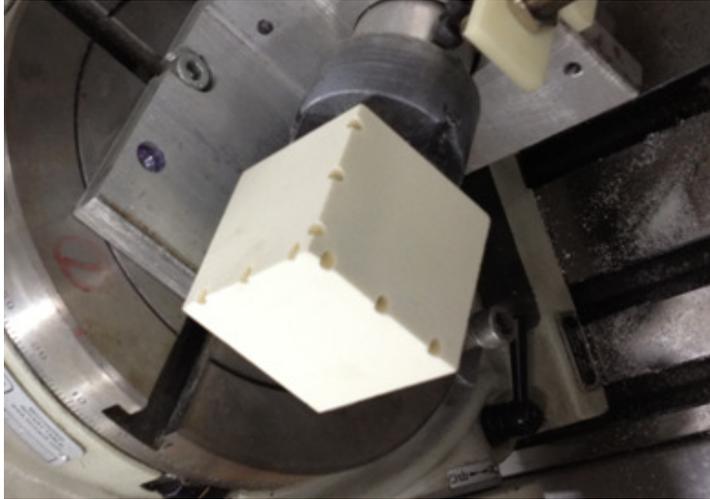
**Figura 19 – Driver do quinto eixo adaptado no painel da fresadora**

**Fonte: Autoria Própria.**

No *software* EMC2, uma nova configuração foi desenvolvida de acordo com as características da nova máquina. A pinagem do conector DB25 do painel da fresadora tinha configuração diferente do utilizado anteriormente, na bancada experimental, sendo, então, necessária a adaptação do EMC2 para tal. O curso dos eixos lineares foi ajustado de acordo com os limites da fresadora: eixo X com 460 mm, eixo Y com 260 mm e eixo Z com 340mm; bem como a configuração de micropasso dos *drivers*. Os sensores dos eixos lineares da fresadora Tormach PCNC 1100 possuem dupla função, atuando na identificação da posição *home* e emergência por fim de curso. Sendo assim, a função do sensor foi também reconfigurada no *software* EMC2 – na nova configuração; a posição *home* dos eixos se dá imediatamente após o desacionamento do sensor, de maneira que a emergência só será acionada no caso de perda de controle de posicionamento.

Para o desenvolvimento de um código G que demonstrasse a utilização da mesa rotativa, foi desenvolvido no SolidWorks um modelamento matemático da estrutura da fresadora Tormach com os cinco eixos. Neste modelamento foi inserido o desenho da peça a ser usinada no primeiro teste, sendo este um cubo com furações em ângulo nas arestas, e a partir da montagem do modelamento gerou-se o código G

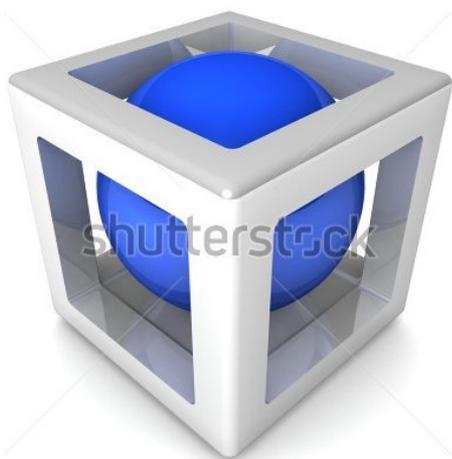
manualmente. O teste realizado foi bem sucedido, porém foi verificado que as furações não ficaram perfeitamente coincidentes com as arestas do cubo, conforme Figura 20.



**Figura 20 – Usinagem de furação em ângulo em aresta de cubo, fresadora Tormach**

**Fonte: Autorial Própria.**

Após concluir que as movimentações dos eixos da máquina estavam de acordo com o proposto no código G, iniciou-se a elaboração de uma segunda peça que demonstrasse de maneira mais clara a utilização dos cinco eixos da máquina. Optou-se por utilizar uma esfera contida em um cubo representado apenas pelas arestas, como exemplificado na Figura 21.



**Figura 21 – Modelo utilizado para demonstração de geometria complexa**

**Fonte: SHUTTERSTOCK, 2013.**

Devido à complexidade do código para a usinagem de tal geometria, verificou-se a necessidade de utilizar um software CAM. O software CAM escolhido foi o PowerMILL. Como a versão disponibilizada pela UTFPR tem licença para apenas três eixos, foram desenvolvidas estratégias de usinagem que trabalhassem com os eixos rotativos preposicionados e travados para usinagem face a face.

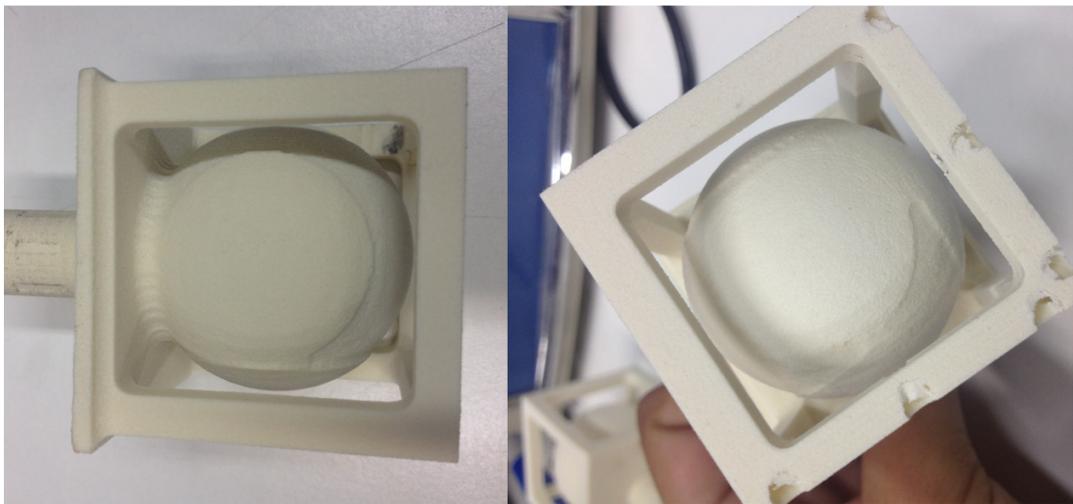
A ferramenta de corte utilizada no teste anterior foi uma ferramenta de topo com diâmetro 4mm. No segundo teste, optou-se por utilizar uma ferramenta esférica, também de diâmetro 4mm. Esta mudança foi necessária a fim de alcançar um melhor acabamento na superfície usinada. Inicialmente, foi usinada a face superior da peça. Como o código gerado possibilitava a movimentação apenas dos eixos lineares, os eixos rotativos foram previamente posicionados. O processo foi repetido para cada face, utilizando-se um código específico para o topo e outro código para as faces laterais, totalizando cinco faces usinadas. A peça resultante desta usinagem apresentou variações geométricas em relação ao projeto; com auxílio de simulações no SolidWorks, verificou-se que as variações foram provenientes de erros de posicionamento do eixo B em relação ao eixo A.

Na tentativa de corrigir o problema de posicionamento do eixo B em relação ao eixo A, o conjunto foi desmontado e montado novamente com o auxílio do próprio cabeçote da máquina, onde o eixo do motor do eixo B foi fixado no mandril do cabeçote, como exibido na Figura 22, e então posicionado na mesa rotativa (eixo A) de acordo com as referências da máquina. Ao concluir a fixação, no momento de soltar mandril, ouviu-se um estalo proveniente do assentamento do suporte do eixo B na mesa rotativa, que comprovou-se como uma perda de referenciamento após a usinagem da terceira peça, já que esta também apresentou variações geométricas em relação ao projeto, como exibido na Figura 23.



**Figura 22 – Referenciamento da fresadora Tormach com auxílio de mandril**

**Fonte: Autoria Própria.**

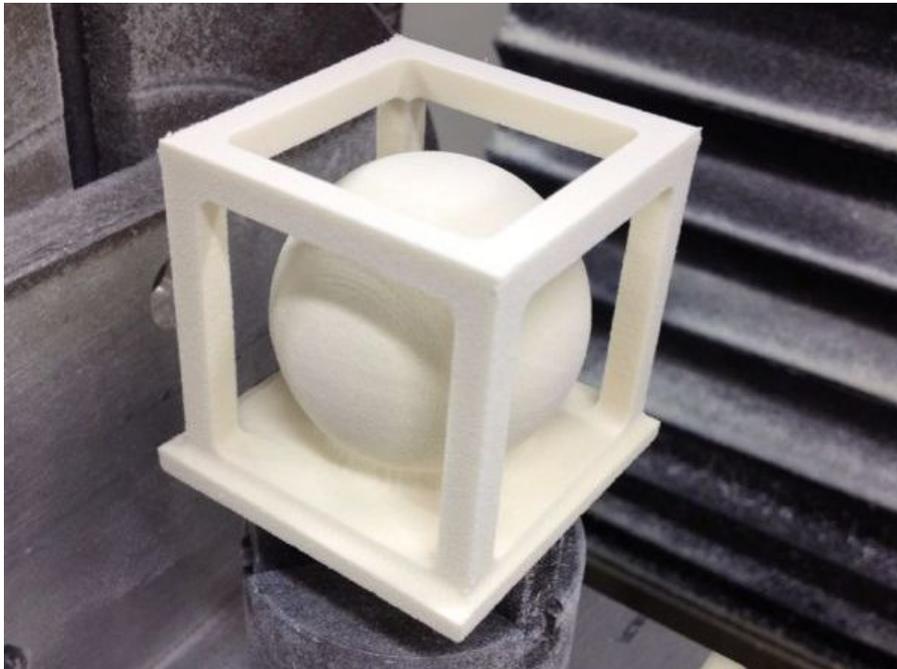


**Figura 23 – Defeito de usinagem devido a problema de referenciamento**

**Fonte: Autoria Própria.**

Com o resultado da usinagem após a correção de posicionamento, concluiu-se que o erro estava tanto na perpendicularidade do suporte do motor do eixo B no eixo A, quanto na coincidência da linha concêntrica dos eixos rotativos. Um novo

posicionamento foi feito, utilizando-se o mesmo método anterior, com o auxílio do mandril, corrigindo também a perpendicularidade entre os eixos rotativos, com a inserção um calço no suporte do motor do eixo B. Na quarta tentativa de usinagem obteve-se um resultado satisfatório, já que as variações geométricas na peça usinada, provenientes de erro de posicionamento nos eixos rotativos, foram praticamente eliminadas. Na Figura 24 é possível visualizar o resultado da quarta usinagem, onde o erro não foi totalmente eliminado, devido ao suporte do eixo B não ter sido usinado de forma a garantir perfeita geometria de perpendicularidade.



**Figura 24 – Usinagem final em fresadora Tormach PCNC 1100 com cinco eixos**

**Fonte: Autoria Própria.**

## 5 CONCLUSÕES

Os objetivos propostos no início do projeto foram atingidos, uma vez que foi obtido sucesso na montagem, adaptação e controle dos eixos rotativos, não só na bancada experimental, bem como na fresadora Tormach PCNC 1100. O projeto elaborado levou à ampliação de conhecimentos nas áreas de controle de máquinas CNC, acionamento de motores de passo através de *drivers* industriais, projetos eletrônicos e tratamento de sinais.

No desenvolvimento da bancada experimental, foram consideradas as dimensões do quarto eixo, já disponível, de modo a adaptar sua utilização na bancada. O quinto eixo também foi desenvolvido de acordo com as dimensões do quarto eixo, a fim de possibilitar a compatibilidade entre ambos. Na realização dos testes de usinagem, realizados na bancada experimental, comprovou-se a necessidade desta como ambiente seguro, uma vez que, durante a execução dos testes os erros ocorridos não danificaram a estrutura da máquina.

Considerando que o projeto abrange diversas áreas de conhecimento e em algumas situações conhecimentos técnicos aprofundados, fora do domínio da equipe, dificuldades foram encontradas ao longo da execução. As informações encontradas, relativas às configurações do *software* EMC2, para trabalhar com mais de um eixo rotativo, são escassas, exigindo muito tempo por parte da equipe para configurar o *software* de acordo com a disposição da máquina. Tendo em vista a dificuldade encontrada em relação ao EMC2, tomou-se a iniciativa de disponibilizar a documentação criada a partir do conhecimento adquirido. Um manual de auxílio à configuração do *software* EMC2 – para máquinas com eixos rotativos – e comunicação computador/máquina, foi elaborado e incorporado ao trabalho, no Apêndice A.

Nos circuitos eletrônicos também foram encontradas dificuldades, inicialmente por ruídos no sistema de controle, durante a elaboração da bancada experimental, gerados pela fonte de alimentação e, posteriormente, na fresadora Tormach PCNC 1100, originados a partir das funções desabilitadas da máquina, para possibilitar a implementação do comando da mesa bi-rotativa. Através de testes isolados, foi possível

encontrar os problemas na interface eletrônica e, então, solucioná-los, concluindo a implementação da eletrônica de interface computador/máquina.

Considerando a dificuldade para gerar arquivos pós-processadores para máquinas dedicadas, parte dos códigos de máquina utilizados foram desenvolvidos manualmente, com o auxílio de modelamentos matemáticos, da máquina e das peças a serem usinadas, no *software* SolidWorks; e a outra parte dos códigos no *software* PowerMILL, com licença para três eixos, utilizando o pós-processador *standard*. Esses códigos foram editados para trabalhar no sistema 3+2, onde não há movimentação simultânea dos eixos lineares e rotativos.

O nível de precisão mecânica, obtido na montagem da mesa bi-rotativa, foi satisfatório para a demonstração didática do funcionamento de uma máquina de cinco eixos; porém, esta não está perfeitamente alinhada, gerando imperfeições geométricas na casa dos décimos de milímetro, dependendo da complexidade da geometria, conforme verificado na usinagem final.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

São sugeridas as seguintes melhorias para o projeto e proposta para trabalhos futuros:

- Desenvolver um pós-processador para a fresadora Tormach PCNC 1100 com a mesa bi-rotativa anexa;
- Projetar um suporte do segundo eixo rotativo, que corrija o desalinhamento atual entre os eixos rotativos.

## REFERÊNCIAS

BREAKOUT BOARD. **5-axis CNC Breakout board User Manual**. Disponível em: <<http://www.machsupport.com/forum/index.php?action=dlattach;topic=21003.0;attach=29693>>. Acessado em 15 dez. 2011.

CNC BRIDGES. **CNC bridges**. Disponível em: <<http://cncbridges.com/>> Acessado em 26 out. 2011.

CNC TOOLKIT. **The CNC Toolkit**. Disponível em: <<http://www.cnc-toolkit.com/index.html>> Acessado em: 20 jul. 2012.

COSTA, André S. **Acoplamentos**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFtBgAF/conceito-acoplamento>> Acessado em: 27 out. 2011.

FERREIRA, Aureo C. **Apostila do curso de introdução ao comando numérico e automatização industrial**. GRUCON, UFSC, 2006.

FAIRES, Virgil M. **Mechanism**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1960.

GOUVEIA, Roberta. **O que é uma fresadora de cinco eixos** Disponível em: <<http://www.mecanicaindustrial.com.br/conteudo/655-o-que-e-uma-fresadora-de-cinco-eixos>> Acessado em: 13 dez. 2012.

KORDIK, Jeff. **Comparação de sistemas com motores de passo e servomotores**. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1087-comparao-de-sistemas-com-motores-de-passo-e-servomotores>> Acessado em: 2 ago. 2013.

KRUG, Rodrigo. **Projeto CNC de 3 eixos utilizando tecnologias livres**. Disponível em: <<http://www.feng.pucrs.br/~rodrigok/arquivos/relatorio.pdf>>. Acessado em: 2 set. 2011.

MACHADO, Aryoldo. **Comando numérico aplicado às máquinas ferramentas**. São Paulo: Ícone Ed. Ícone. 1987.

MACH3. **Mach3**. Disponível em: <<http://www.machsupport.com/software/mach3>>. Acessado em: 7 dez. 2011.

MAKINA ERREMINTAREN MUSEOA. **Fresadoras**. Disponível em: <<http://www.museo-maquina-herramienta.com/historia/Lehenengoko-erremintak/Fresatzeko-makinak>>. Acessado em: 17 out. 2011.

LEADSHINE. **MD2278 Microstepping Driver**. Disponível em: <<http://leadshine.com/UploadFile/Down/MD2278d.pdf>>. Acessado em: 14 dez. 2011.

LINUX CNC. **About the software EMC2**. Disponível em: <<http://www.linuxcnc.org/index.php/english/about>> Acessado em: 5 out. 2011.

LINUX CNC. **Wiki EMC2**. Disponível em: <<http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl>> Acessado em: 21 abr. 2012.

LYRA, Pablo V. A. **Desenvolvimento de uma máquina fresadora CNC didática**. Disponível em: <<http://alvarestech.com/temp/cnc/Fresadora%20CNC%20Did%20E1tica.pdf>>. Acessado em: 2 set. 2011.

OLIVEIRA, Danilo J. **Série metódica para as aulas de fresadora CNC**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABIOIAI/apostila-fresadora-enco-f1>>. Acessado em: 26 set. 2011.

PARKER. **OEM750 Drive**. Disponível em: <<http://www.lna.br/~det/Projetos/TCSPD/doc/oem750ug.pdf>>. Acessado em: 14 dez. 2011.

PMinMO. **EMC2**. Disponível em: <<http://pminmo.com/PMinMOWiki/index.php5?title=EMC2>>. Acessado em: 21 abr. 2012.

POWERMILL. **PowerMILL**. Disponível em: <<http://www.powermill.com/overview/index.asp>>. Acessado em: 9 out. 2012.

QUEIROZ, Marcelo T. **Automação de mesa coordenada destinada à máquina fresadora CNC**. Disponível em: <[http://www.bdtd.ndc.uff.br/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=2244](http://www.bdtd.ndc.uff.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2244)>. Acessado em: 5 out. 2011.

SILVA, Sidnei D. **CNC: Programação de comandos numéricos computadorizados: torneamento**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica , 2005.

SOLIDWORK. **Sobre o SolidWorks**. Disponível em: <[http://www.solidworksbrasil.com.br/sw/6453\\_PTB\\_HTML.htm](http://www.solidworksbrasil.com.br/sw/6453_PTB_HTML.htm)>. Acessado em: 13 nov. 2012.

THOMAZINI, Daniel; ABUQUERQUE, Pedro U. B. de. **Sensores Industriais: Fundamentos e aplicações**. 3. ed., rev. São Paulo: Erica, 2007.

TORMACH. **PCNC 110 Personal CNC Mill**. Disponível em: <[http://www.tormach.com/product\\_pcnc\\_main.html](http://www.tormach.com/product_pcnc_main.html)>. Acessado em: 29 out. 2012.

TOSHIBA. **TB6560AHQ/AFG**. Disponível em: <[http://www.toshiba.com/taec/components2/Datasheet\\_Sync/201103/DST\\_TB6560-TDE\\_EN\\_27885.pdf](http://www.toshiba.com/taec/components2/Datasheet_Sync/201103/DST_TB6560-TDE_EN_27885.pdf)>. Acessado em: 17 mar. 2012.

SHUTTERSTOCK. Disponível em: <<http://www.shutterstock.com/pic-122368747/stock-photo-abstract-design-d-cube-with-sphere-inside.html>> Acessado em: 27 jul. 2013.

UBUNTU. **O que é o Ubuntu?** Disponível em: < <http://www.ubuntu-br.org/>>. Acessado em: 5 out. 2011.

VOLPATO, Neri; AMORIM, J. R. **Fabricação de moldes-protótipo com detalhes de geometrias complexas utilizando se da usinagem de insertos poliméricos**. Disponível em: <<http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/prototipo.asp>>. Acessado em: 9 out. 2012.

## APÊNDICE A – MANUAL DE CONFIGURAÇÃO EMC2

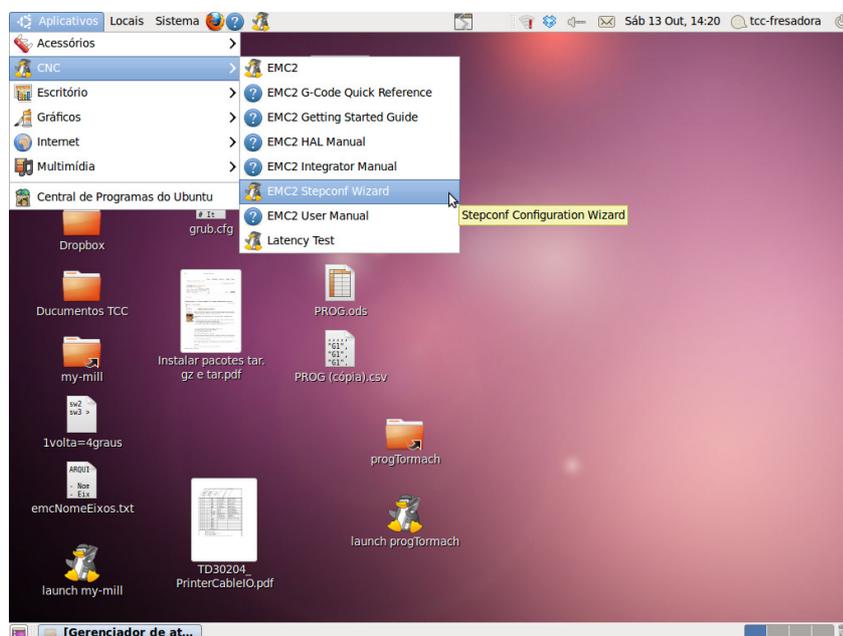
*Software* EMC2 pode ser instalado em um computador que já contenha o sistema operacional Linux, ou pode ser baixado o pacote do Ubuntu já contendo o aplicativo. Os arquivos para *download* e instruções de instalação são encontrados na página do LinuxCNC: <http://www.linuxcnc.org/index.php/download>.

O *software* contém configurações pré-definidas para alguns modelos mais comuns de máquinas, ou uma configuração dedicada pode ser feita para máquinas não comerciais, de acordo as características da máquina.

### Configuração para Máquinas de Cinco Eixos

O aplicativo EMC2 contém um configurador próprio para máquinas dedicadas, porém esse configurador é capaz apenas de gerar o controle de máquinas com até quatro eixos, sendo três lineares e um rotativo. Para gerar o controle para uma máquina de cinco eixos, é necessário iniciar uma configuração para uma máquina de quatro eixos e em seguida editar os arquivos gerados, inserindo manualmente os dados do último eixo, de acordo com os seguintes passos (imagens obtidas no Linux Ubuntu versão 10.04):

- 1- Acessar o *menu* Aplicativos > CNC > EMC2 Stepconf Wizard;



**Figura A1 – Menu caminho para o configurador do EMC2**

**Fonte: Autoria Própria.**

2- A janela inicial do configurador é aberta, deve-se acionar o botão “Avançar”;

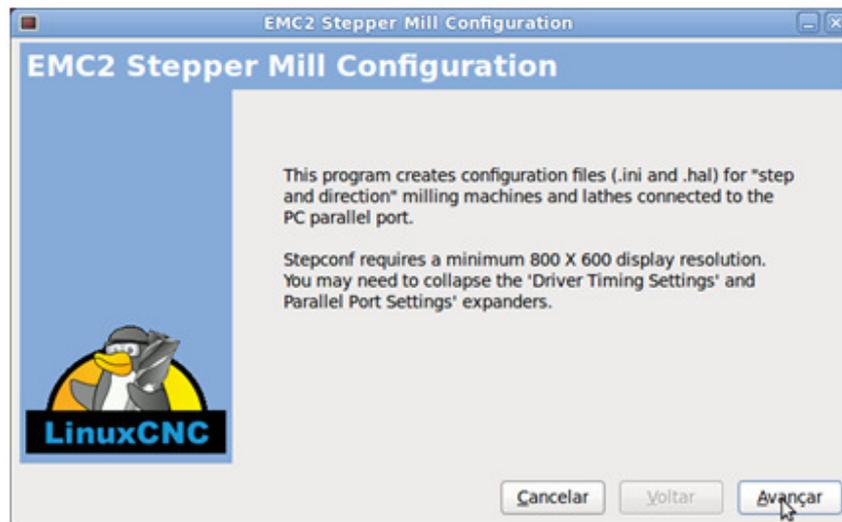


Figura A2 – Tela inicial do configurador EMC2

Fonte: Autoria Própria.

3- Na tela seguinte o usuário deve selecionar a opção de uma nova configuração ou edição de uma configuração criada anteriormente, e em seguida acionar o botão “Avançar”;

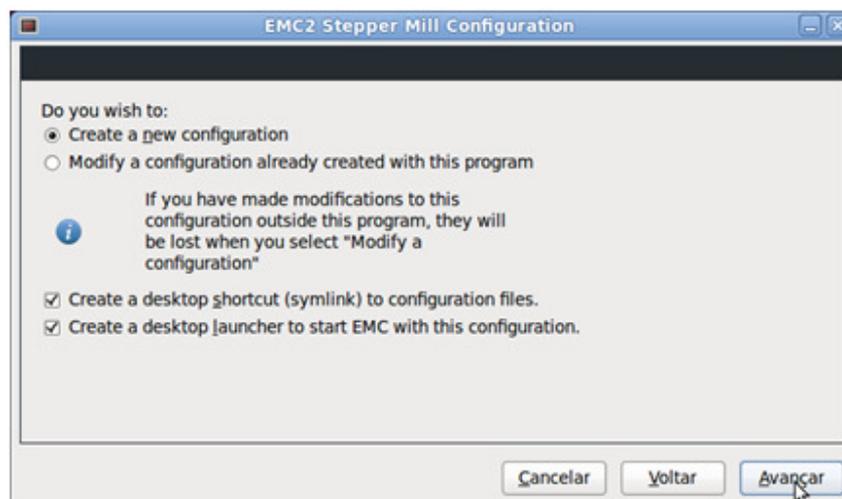
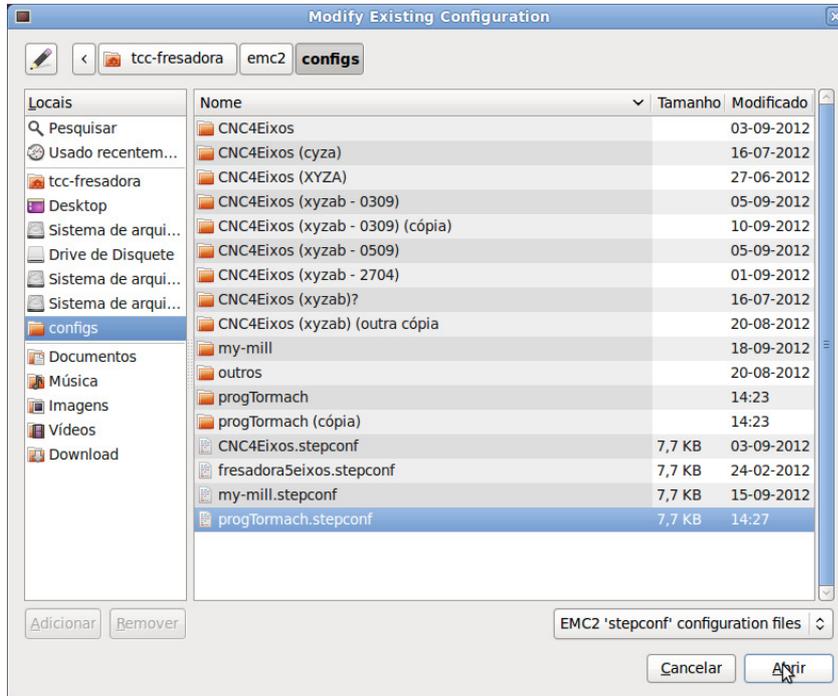


Figura A3 – Tela para criar ou modificar configuração

Fonte: Autoria Própria.

- 4- Caso seja edição de uma configuração, abre-se uma janela para que o usuário selecione o caminho para o arquivo a ser editado (arquivo de extensão *stepconf*) e então, acione “Abrir”;



**Figura A4 – Tela de seleção do arquivo de configuração a ser editado**

**Fonte: Autoria Própria.**

- 5- Para o início da configuração, abrirá uma janela com informações básicas da máquina, caso seja uma edição (opção selecionada na janela anterior) as informações exibidas serão as salvas anteriormente, caso seja uma nova configuração dados pré-configurados serão exibidos:

**EMC2 Stepper Mill Configuration**

**Basic machine information**

Machine Name:  (A)

Configuration directory:  (B)

Axis configuration:  (C)

Machine units:  (C)

Driver characteristics: (Multiply by 1000 for times specified in  $\mu$ s or microseconds)  
Additional signal conditioning or isolation such as optocouplers and RC filters can impose timing constraints of their own, in addition to those of the driver.

Driver type:  (D)

Driver Timing Settings

Step Time:  ns (E)

Step Space:  ns (F)

Direction Hold:  ns (G)

Direction Setup:  ns (H)

Parallel Port Settings

First Parport Base Address:  Out (I)

Second Parport Address:  In (I)

Third Parport Address:  In (I)

Base Period Maximum Jitter:  ns (J) Base Period: 38000 ns

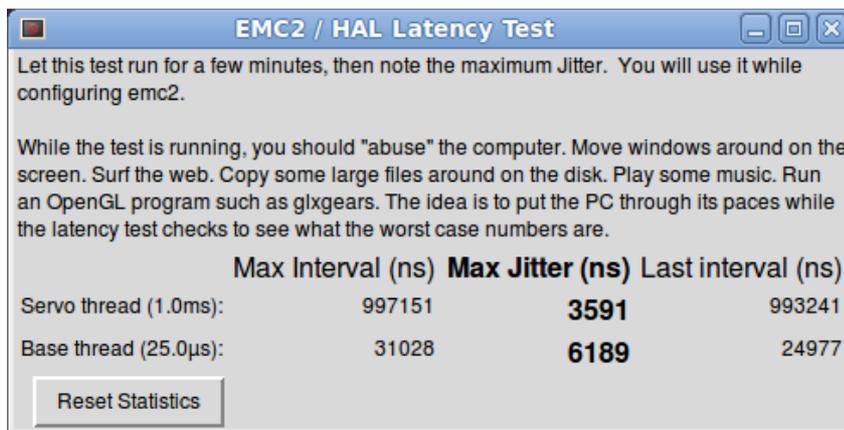
Onscreen prompt for tool change (L)  (K) Max step rate: 26315 Hz

**Figura A5 – Tela de informações básicas da máquina a ser configurada**

**Fonte: Autoria Própria.**

- A. Campo para o nome da máquina (configuração). Os arquivos criados terão este nome e serão salvos no caminho exibido logo abaixo do campo do nome;
- B. Possibilidades de combinações de eixos para a máquina;
- C. Unidade de medida a ser utilizada. Podendo ser milímetros ou polegadas;
- D. Campo para selecionar o tipo de *driver* utilizado. Caso o *driver* utilizado não esteja listado na biblioteca do EMC2, seleciona-se a opção “*Other*” e se configura as definições de tempo (itens E, F, G e H);
- E. Campo para selecionar o tempo em que o sinal de pulso permanece em nível alto. Tempo em nano segundos;
- F. Campo para selecionar o tempo em que o sinal de pulso permanece em nível baixo;

- G. Campo para selecionar o tempo em que o pino de direção fica acionado após mudar a direção;
- H. Campo para selecionar o tempo em que o pino de direção fica acionado até mudar a direção;
- I. Campo para endereço de memória (em hexadecimal) da porta paralela que será utilizada para comunicação pelo EMC2. Comumente a porta paralela é a LPT1, endereço 0x378. Para utilização de mais de uma porta paralela, as caixas de seleção abaixo do campo devem ser selecionados, e inseridos os endereços de memória das portas;
- J. Campo para máximo período de latência, que é o tempo em que o computador leva pra parar o que está fazendo e responder a um pedido externo. O teste de latência pode ser feito no item seguinte;
- K. Acionando o botão "*Test Base Period Jitter*", abre-se uma janela para teste de latência. Deve-se usar a capacidade máxima do computador, executando vários programas ao mesmo tempo, e anotar o maior valor em "Max Jitter" para colocar no campo de período máximo de latência;

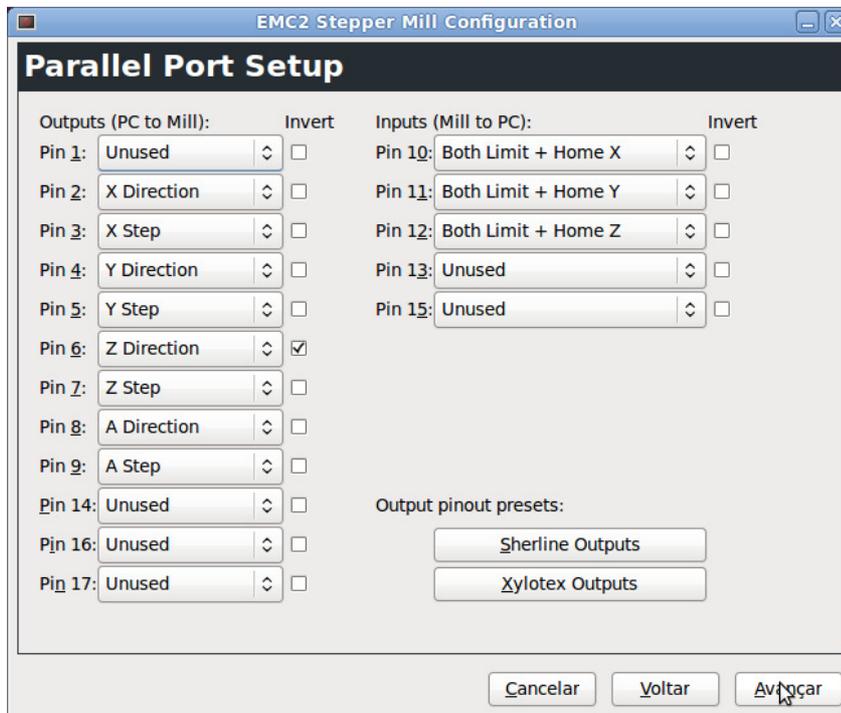


**Figura A6 – Tela para teste de latência**

**Fonte: Autoria Própria.**

- L. Caixa de seleção para habilitar o aviso de troca de ferramenta exibido na tela. Após configurar todos os campos, aciona-se o botão avançar;
- 6- O passo seguinte é a configuração de cada pino da porta paralela, onde os pinos de 1 a 9, 14, 16 e 17 são saídas de sinal, e os pinos de 10 a 13 e 15 são entradas de sinal. Quando o pino não vai ser utilizado deve-se selecionar a opção "*Unused*".

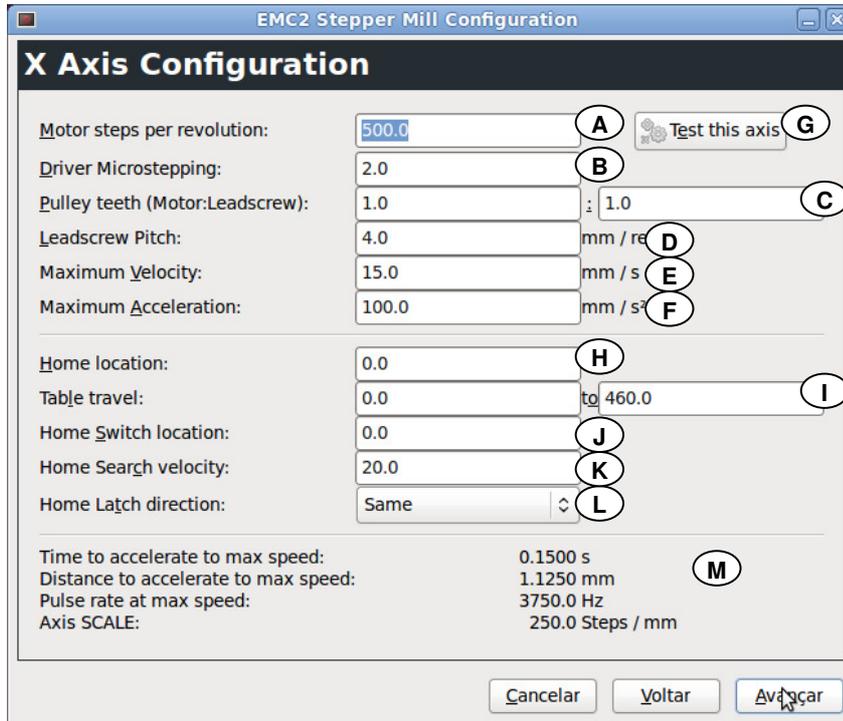
Ao lado da lista de seleção da função de cada pino existe uma caixa de seleção, para inverter o sinal do pino, o que define se este será acionado em nível alto ou nível baixo. Ao termino da configuração pressione “Avançar”;



**Figura A7 – Tela de configuração dos pinos da porta paralela**

**Fonte: Autoria Própria.**

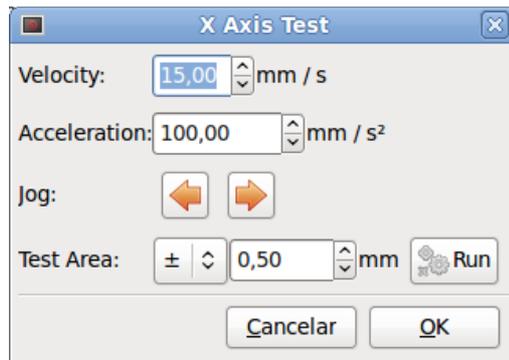
7- Por fim, configura-se os dados de cada eixo, considerando motor, sensores e curso do eixo:



**Figura A8 – Tela para configuração de cada eixo**

**Fonte: Autoria Própria.**

- A. Campo para inserir quantos passos o motor vai realizar por revolução;
- B. Campo para o número de divisões por passo, de acordo com a configuração do *driver*;
- C. Campo para relação entre motor e fuso de esfera utilizados no eixo;
- D. Campo para o passo do fuso de esfera que está sendo utilizado;
- E. Campo para a velocidade máxima que poderá ser aplicada no eixo;
- F. Campo para a aceleração máxima que poderá ser aplicada no eixo;
- G. Botão para executar teste de movimentação do eixo, quanto à velocidade e aceleração, conforme figura abaixo:



**Figura A9 – Simulador de velocidade e aceleração**

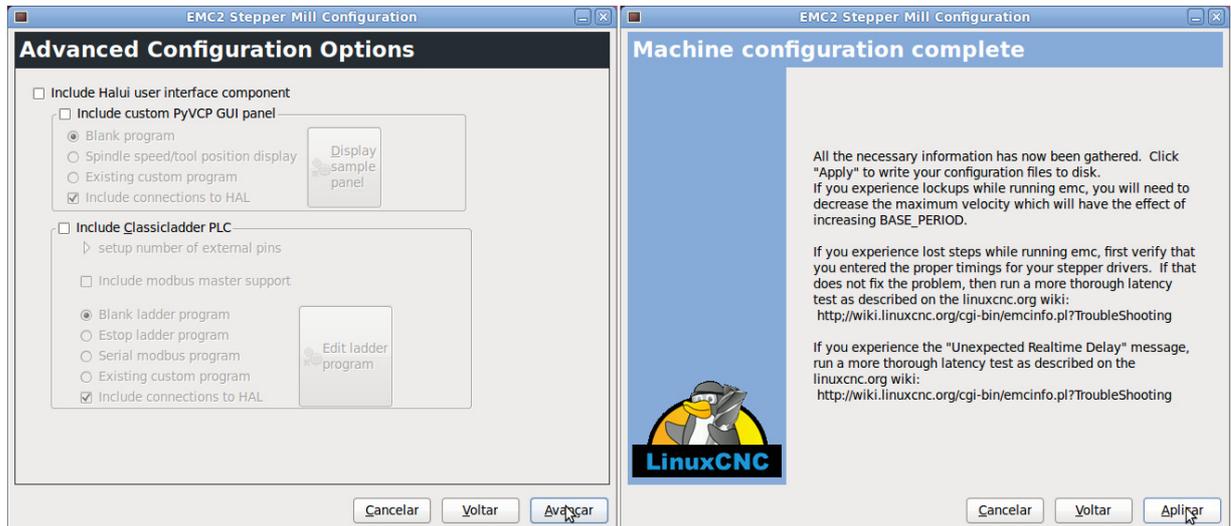
**Fonte: A autoria Própria.**

Para executar o teste, basta estimar valores para velocidade e aceleração, selecionar uma direção para o motor e uma medida para deslocamento; ao apertar o botão “Run” o eixo se movimentará de acordo com configurações, a velocidade e a aceleração poderão ser ajustadas de acordo com as limitações da máquina;

- H. “Home location” é a posição para onde o eixo vai após chegar ao sensor *home*;
- I. “Table travel” é todo o curso do eixo, primeiro campo é o limite mínimo do curso e segundo campo o limite máximo. O limite mínimo pode começar em 0 (zero) ou em um valor negativo, bem como o limite máximo pode acabar em 0 também desde que o curso comece em um valor negativo;
- J. “Home Switch location” é a posição do curso em que estará localizado o sensor *home*;
- K. Em “Home Search velocity” configura-se a velocidade em que o eixo se movimenta quando está procurando o sensor *home*;
- L. “Home Latch Direction” indica se ao encontrar o sensor *home*, o eixo vai parar acionando-o (same) ou logo após desacioná-lo (opposite);
- M. Quadro exibe informações calculadas através dos campos aferidos anteriormente.

Uma nova janela de configuração será aberta para cada eixo, sendo que para o eixo rotativo a unidade de distância será calculada em graus. Após configurar cada eixo deve-se acionar o botão “Avançar”;

- 8- Tela para configurações avançadas (caixas de seleção devem ser marcadas para a inclusão de configurações) e tela informativa de configuração terminada. Para finalizar configuração basta selecionar em “Avançar”.

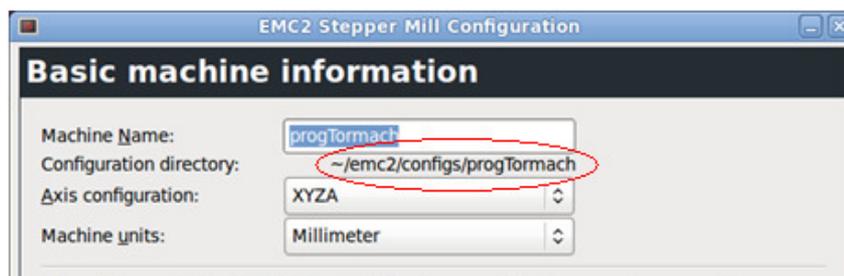


**Figura A10 – Tela de configurações avançadas e finalização de configuração**

**Fonte: Autoria Própria.**

- 9- Com a configuração finalizada, quatro eixos da máquina já poderão estar operantes. Para a inserção do último eixo rotativo é necessário editar manualmente dois arquivos que foram criados a partir da configuração.

O caminho para o diretório aonde serão encontrados os arquivos a serem editados é exibido na primeira tela de configuração:

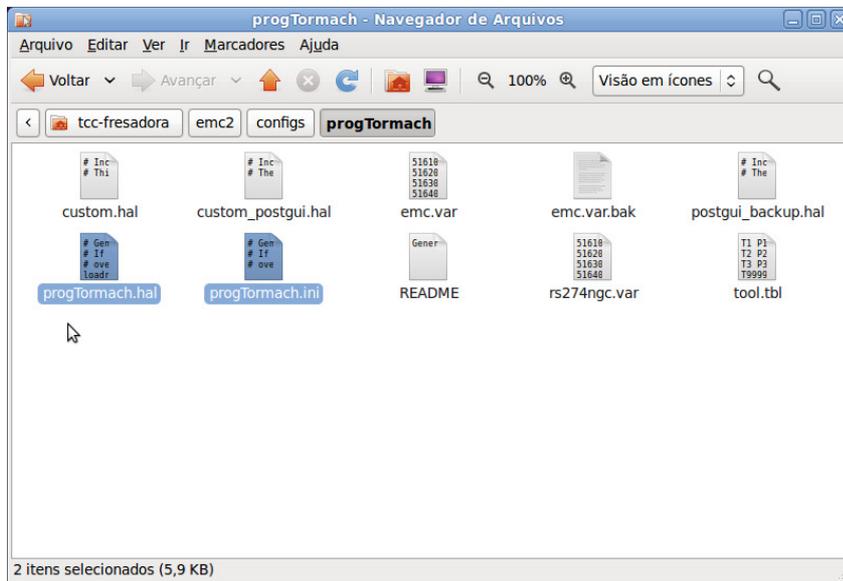


**Figura A11 – Informação do diretório em que a configuração será salva**

**Fonte: Autoria Própria.**

Ao acessar o diretório, os arquivos que serão utilizados são os que receberam o nome da máquina, configurado anteriormente com extensão *nome\_máquina.ini* e *nome\_máquina.hal*.

Os arquivos podem ser abertos com um programa editor de texto;



**Figura A12 – Arquivos gerados pela configuração, a serem editados com o informações referentes ao quinto eixo**

**Fonte: Autoria Própria.**

10- O arquivo *nome\_máquina.ini*, contém os dados de configuração da máquina, nele deve-se indicar a existência de um novo eixo e inserir as configurações referentes a este eixo.

As informações do arquivo são divididas em seções, primeiramente se utilizará a seção *[TRAJ]*, onde será editada a variável *AXES = 5*, e adicionado o eixo B em *COORDINATES*, como exibe a Figura A13:

<pre> POSTGUI_HALFILE = custom_postgui.hal  [TRAJ] AXES = 4 COORDINATES = X Y Z A MAX_ANGULAR_VELOCITY = 15.00 DEFAULT_ANGULAR_VELOCITY = 1.50 LINEAR_UNITS = mm ANGULAR_UNITS = degree CYCLE_TIME = 0.010 DEFAULT_VELOCITY = 1.50 MAX_LINEAR_VELOCITY = 15.00           </pre>	<pre> POSTGUI_HALFILE = custom_postgui.hal  [TRAJ] AXES = 5 COORDINATES = X Y Z A B MAX_ANGULAR_VELOCITY = 15.00 DEFAULT_ANGULAR_VELOCITY = 1.50 LINEAR_UNITS = mm ANGULAR_UNITS = degree CYCLE_TIME = 0.010 DEFAULT_VELOCITY = 1.50 MAX_LINEAR_VELOCITY = 15.00           </pre>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Figura A13 – Arquivo *nome\_máquina.ini* editado para cinco eixos**

**Fonte: Autoria Própria.**

Após editar os campos que indicam os eixos, deve-se inserir a seção referente ao quinto eixo, esta seção pode ser uma cópia do eixo A ([*AXIS\_3*]), com as seguintes adaptações:

- O nome da seção deve ser [*AXIS\_4*], considerando a indicação do número para o devido eixo: 0=X, 1=Y, 2=Z, 3=A, 4=B E 5=C;
- *TYPE*: informa o tipo de eixo, que deve ser *ANGULAR*, se tratando do eixo B;
- *MAX\_VELOCITY* e *MAX\_ACCELERATION*: é valor máximo de velocidade e aceleração que o eixo pode atingir;
- *SCALE*: valor da relação de passos por unidade de medida de deslocamento do eixo; sendo o eixo B um eixo rotativo, a unidade de medida é graus;
- *MIN\_LIMIT* e *MAX\_LIMIT*: São os parâmetros de início e fim do curso do eixo;
- *HOME\_OFFSET*: ponto em que o eixo ficará posicionado após encontrar o sensor de *home*;
- *HOME\_SEQUENCE*: (campo opcional) deve estar presente nas seções dos eixos em que se deseja executar o processo de *home* sequencialmente, sendo 0 (zero) o primeiro eixo e incrementado nos eixos de acordo com a sequência de *home*.

<pre>HOME_SEQUENCE = 2  [AXIS 2] TYPE = LINEAR HOME = 0.0 MAX_VELOCITY = 15.0 MAX_ACCELERATION = 100.0 STEPGEN_MAXACCEL = 125.0 SCALE = 250.0 FERROR = 1 MIN_FERROR = .25 MIN_LIMIT = -0.001 MAX_LIMIT = 350.0 HOME_OFFSET = 0.000000 HOME_SEARCH_VEL = 20.000000 HOME_LATCH_VEL = -2.000000 HOME_IGNORE_LIMITS = YES HOME_SEQUENCE = 0  [AXIS 3] TYPE = ANGULAR HOME = 0.0 MAX_VELOCITY = 15.0 MAX_ACCELERATION = 100.0 STEPGEN_MAXACCEL = 125.0 SCALE = 250.0 FERROR = 1 MIN_FERROR = .25 MIN_LIMIT = -180.0 MAX_LIMIT = 180.0 HOME_OFFSET = 0.0</pre>	<pre>HOME_OFFSET = 0.000000 HOME_SEARCH_VEL = 20.000000 HOME_LATCH_VEL = -2.000000 HOME_IGNORE_LIMITS = YES HOME_SEQUENCE = 0  [AXIS 3] TYPE = ANGULAR HOME = 0.0 MAX_VELOCITY = 15.0 MAX_ACCELERATION = 100.0 STEPGEN_MAXACCEL = 125.0 SCALE = 250.0 FERROR = 1 MIN_FERROR = .25 MIN_LIMIT = -180.0 MAX_LIMIT = 180.0 HOME_OFFSET = 0.0  [AXIS 4] TYPE = ANGULAR HOME = 0.0 MAX_VELOCITY = 18.0 MAX_ACCELERATION = 100.0 STEPGEN_MAXACCEL = 125.0 SCALE = 320.0 FERROR = 1 MIN_FERROR = .25 MIN_LIMIT = -360.0 MAX_LIMIT = 360.0 HOME_OFFSET = 0.0</pre>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Figura A14– Arquivo *nome\_máquina.ini* editado com parâmetros do quinto eixo**

**Fonte: Autoria Própria.**

11- Já o arquivo *nome\_máquina.hal*, contém os dados de configuração da porta paralela, onde o sinal de cada eixo deve ser indicado, bem como seus sensores.

No início do arquivo, na linha `loadrt stepgen step_type`, deve-se adicionar um zero para indicar a existência de mais um eixo, sendo agora cinco eixos.

<pre># Generated by stepconf at Mon Oct 29 19:46:34 20 # If you make changes to this file, they will be # overwritten when you run stepconf again loadrt trivkins loadrt [EMCMOT]EMCMOT base_period_nsec=[EMCMOT]BA loadrt probe_parport loadrt hal_parport cfg="0x378 out " setp parport.0.reset-time 5000 loadrt stepgen step_type=0,0,0,0  addf parport.0.read base-thread</pre>	<pre># Generated by stepconf at Thu Oct 18 19:30:25 20 # If you make changes to this file, they will be # overwritten when you run stepconf again loadrt trivkins loadrt [EMCMOT]EMCMOT base_period_nsec=[EMCMOT]BA loadrt probe_parport loadrt hal_parport cfg="0x378 out " setp parport.0.reset-time 5000 loadrt stepgen step_type=0,0,0,0,0  addf parport.0.read base-thread</pre>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Figura A15 – Arquivo *nome\_máquina.hal* editado para cinco eixos**

**Fonte: Autoria Própria.**

Os pinos dos sinais de pulso e direção, para o novo eixo, devem ser indicados de acordo com o exemplo dos eixos já existentes, conforme Figura A16; exibindo nome do eixo, sinal de pulso ou direção, e número do pino.

Deve-se cuidar para que a organização dos pinos de saída da porta paralela (de 1 a 9, 14, 16 e 17) fiquem em sequência numérica, no arquivo de configuração.

<pre>net spindle-cmd &lt;= motion.spindle-speed-out  net xdir =&gt; parport.0.pin-02-out net xstep =&gt; parport.0.pin-03-out setp parport.0.pin-03-out-reset 1 net ydir =&gt; parport.0.pin-04-out net ystep =&gt; parport.0.pin-05-out setp parport.0.pin-05-out-reset 1 setp parport.0.pin-06-out-invert 1 net zdir =&gt; parport.0.pin-06-out net zstep =&gt; parport.0.pin-07-out setp parport.0.pin-07-out-reset 1 net adir =&gt; parport.0.pin-08-out net astep =&gt; parport.0.pin-09-out setp parport.0.pin-09-out-reset 1 net astep =&gt; parport.0.pin-14-out setp parport.0.pin-14-out-reset 1 net adir =&gt; parport.0.pin-17-out</pre>	<pre>net spindle-cmd &lt;= motion.spindle-speed-out  net xdir =&gt; parport.0.pin-02-out net xstep =&gt; parport.0.pin-03-out setp parport.0.pin-03-out-reset 1 net ydir =&gt; parport.0.pin-04-out net ystep =&gt; parport.0.pin-05-out setp parport.0.pin-05-out-reset 1 setp parport.0.pin-06-out-invert 1 net zdir =&gt; parport.0.pin-06-out net zstep =&gt; parport.0.pin-07-out setp parport.0.pin-07-out-reset 1 net adir =&gt; parport.0.pin-08-out net astep =&gt; parport.0.pin-09-out setp parport.0.pin-09-out-reset 1 net bstep =&gt; parport.0.pin-14-out setp parport.0.pin-14-out-reset 1 net bdir =&gt; parport.0.pin-17-out</pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Figura A16 – Inserção do sinal de pulso e direção do quinto eixo no arquivo *nome\_máquina.hal***

**Fonte: Autoria Própria.**

O pino para o sensor do eixo B, também listado dentro da sequência numérica, deve exibir o tipo de sensor (apenas sensor de *home*, no caso do eixo B), nome do eixo e número do pino de entrada (de 10 a 14 e 15), de acordo com o exemplo na Figura A17.

<pre>net adir =&gt; parport.0.pin-17-out  net both-home-x &lt;= parport.0.pin-10-in net both-home-y &lt;= parport.0.pin-11-in net both-home-z &lt;= parport.0.pin-12-in net home-a &lt;= parport.0.pin-13-in-not</pre>	<pre>net bdir =&gt; parport.0.pin-17-out  net both-home-x &lt;= parport.0.pin-10-in net both-home-y &lt;= parport.0.pin-11-in net both-home-z &lt;= parport.0.pin-12-in net home-a &lt;= parport.0.pin-13-in-not net home-b &lt;= parport.0.pin-15-in-not</pre>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Figura A17 – Inserção do sinal de sensor do quinto eixo no arquivo *nome\_máquina.hal***

**Fonte: Autoria Própria.**

Por fim deve inserir campo referente às informações dos periféricos do eixo B, que é semelhante ao eixo A, apenas substituindo-se o número do eixo, de 3 para 4, e o nome do eixo, de A para B.

<pre>setp stepgen.2.position-scale [AXIS_2]SCALE setp stepgen.2.stepslen 1 setp stepgen.2.stepspace 0 setp stepgen.2.dirhold 24900 setp stepgen.2.dirsetup 24900 setp stepgen.2.maxaccel [AXIS_2]STEPGEN_MAXACCEL net zpos-cmd axis.2.motor-pos-cmd =&gt; stepgen.2.position-cmd net zpos-fb stepgen.2.position-fb =&gt; axis.2.motor-pos-fb net zstep &lt;= stepgen.2.step net zdir &lt;= stepgen.2.dir net zenable axis.2.amp-enable-out =&gt; stepgen.2.enable net both-home-z =&gt; axis.2.home-sw-in net both-home-z =&gt; axis.2.neg-lim-sw-in net both-home-z =&gt; axis.2.pos-lim-sw-in  setp stepgen.3.position-scale [AXIS_3]SCALE setp stepgen.3.stepslen 1 setp stepgen.3.stepspace 0 setp stepgen.3.dirhold 24900 setp stepgen.3.dirsetup 24900 setp stepgen.3.maxaccel [AXIS_3]STEPGEN_MAXACCEL net apos-cmd axis.3.motor-pos-cmd =&gt; stepgen.3.position-cmd net apos-fb stepgen.3.position-fb =&gt; axis.3.motor-pos-fb net astep &lt;= stepgen.3.step net adir &lt;= stepgen.3.dir net aenable axis.3.amp-enable-out =&gt; stepgen.3.enable net home-a =&gt; axis.3.home-sw-in  net estop-out &lt;= iocontrol.0.user-enable-out net estop-out =&gt; iocontrol.0.emc-enable-in  loadusr -W hal_manualtoolchange net tool-change iocontrol.0.tool-change =&gt; hal_manualtoolchange</pre>	<pre>setp stepgen.3.position-scale [AXIS_3]SCALE setp stepgen.3.stepslen 1 setp stepgen.3.stepspace 0 setp stepgen.3.dirhold 24900 setp stepgen.3.dirsetup 24900 setp stepgen.3.maxaccel [AXIS_3]STEPGEN_MAXACCEL net apos-cmd axis.3.motor-pos-cmd =&gt; stepgen.3.position-cmd net apos-fb stepgen.3.position-fb =&gt; axis.3.motor-pos-fb net astep &lt;= stepgen.3.step net adir &lt;= stepgen.3.dir net aenable axis.3.amp-enable-out =&gt; stepgen.3.enable net home-a =&gt; axis.3.home-sw-in  setp stepgen.4.position-scale [AXIS_4]SCALE setp stepgen.4.stepslen 1 setp stepgen.4.stepspace 0 setp stepgen.4.dirhold 24900 setp stepgen.4.dirsetup 24900 setp stepgen.4.maxaccel [AXIS_4]STEPGEN_MAXACCEL net bpos-cmd axis.4.motor-pos-cmd =&gt; stepgen.4.position-cmd net bpos-fb stepgen.4.position-fb =&gt; axis.4.motor-pos-fb net bstep &lt;= stepgen.4.step net bdir &lt;= stepgen.4.dir net benable axis.4.amp-enable-out =&gt; stepgen.4.enable net home-b =&gt; axis.4.home-sw-in  net estop-out &lt;= iocontrol.0.user-enable-out net estop-out =&gt; iocontrol.0.emc-enable-in  loadusr -W hal_manualtoolchange net tool-change iocontrol.0.tool-change =&gt; hal_manualtoolchange</pre>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Figura A18 – Arquivo *nome\_máquina.hal* editado com informações dos periféricos do quinto eixo**

**Fonte: Autoria Própria.**

## Comunicação via porta paralela

Para as máquinas utilizadas, bancada experimental e Fresadora Tormach PCNC 1100, foram utilizados dois diferentes *hardwares* de acionamento, contendo cada um deles configurações específicas da porta paralela; sendo que para bancada experimental foi utilizada a placa 5 Axis Breakout Board juntamente com a placa amplificadora, e para a fresadora

Tormach utilizou-se a sua própria placa acionadora, além de uma placa para acionamento do eixo B e leitura dos sensores A e B.

- 1- Disposição dos pinos da porta paralela para comunicação com bancada experimental:

**Tabela A1 – Configuração dos pinos da porta paralela para a bancada experimental**

Pino	Função
1	Enabled – Não utilizado
2	Pulso do eixo X
3	Direção do eixo Y
4	Pulso do eixo B
5	Direção do eixo A
6	Pulso do eixo A
7	Pulso do eixo Z
8	Direção do eixo Z
9	Motor do <i>Spindle</i> – Não utilizado
10	Sensor <i>home</i> de B
11	Sensor <i>home</i> de Y
12	Sensor <i>home</i> de Z
13	Sensor <i>home</i> de A
14	Direção do eixo X
15	Sensor de Emergência
16	Pulso do eixo Y
17	Direção do eixo B

**Fonte: Autoria Própria.**

- 2- Disposição dos pinos da porta paralela para comunicação com Fresadora Tormach PCNC 1100 adaptada para cinco eixos:

**Tabela A2 – Configuração dos pinos da porta paralela para a fresadora Tormach PCNC 1100**

Pino	Função
1	Velocidade do <i>Spindle</i> – Não utilizado
2	Direção do eixo X
3	Pulso do eixo X
4	Direção do eixo Y
5	Pulso do eixo Y
6	Direção do eixo Z
7	Pulso do eixo Z

- 8 Direção do eixo A
- 9 Pulso do eixo A
- 10 Sensor limite e *home* do eixo X
- 11 Sensor limite e *home* do eixo Y
- 12 Sensor limite e *home* do eixo Z
- 13 Sensor *home* do eixo A
- 14 Pulso do eixo B
- 15 Sensor *home* do eixo B
- 16 Direção do *Spindle* – Não utilizado
- 17 Direção do eixo B

Fonte: Autoria Própria.

### Utilização do *software* EMC2 personalizado

Após todas as configurações feitas, pode-se executar o programa:

- 1- Acessar *menu* Aplicativos > CNC > EMC2;

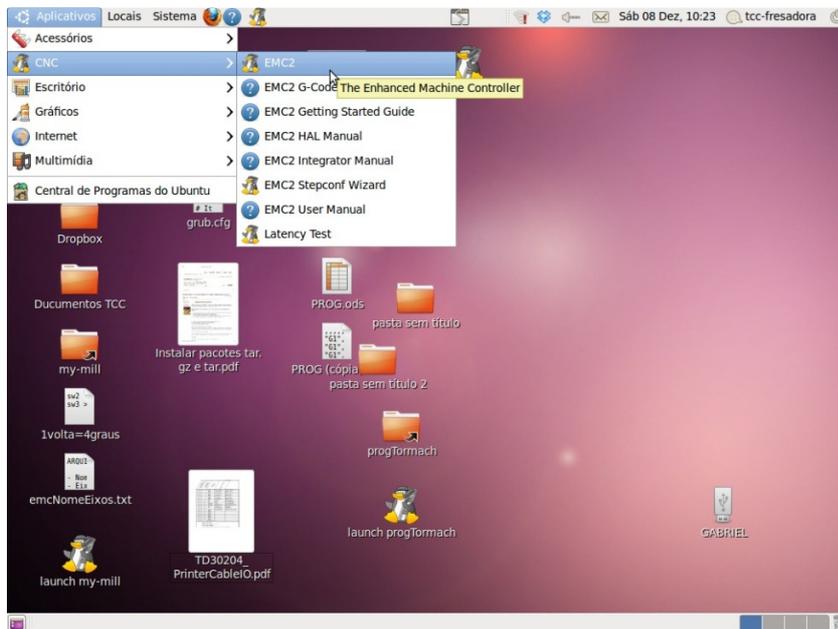


Figura A19 – *Menu* caminho para execução do programa

Fonte: Autoria Própria.

- 2- A janela de seleção de configuração de máquina é aberta, onde uma lista de todas as máquinas configuradas é exibida, inclusive as configurações padrão do aplicativo. Deve-se selecionar a máquina a ser executada e acionar o botão “OK”;

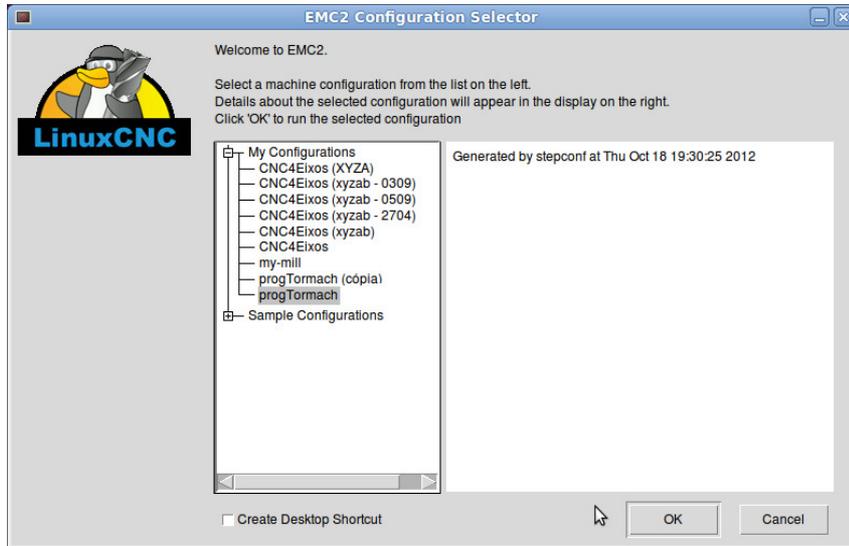


Figura A20 – Tela de seleção de máquina

Fonte: Autoria Própria.

3- As configurações da máquina são carregadas e a tela principal do EMC2 é aberta.

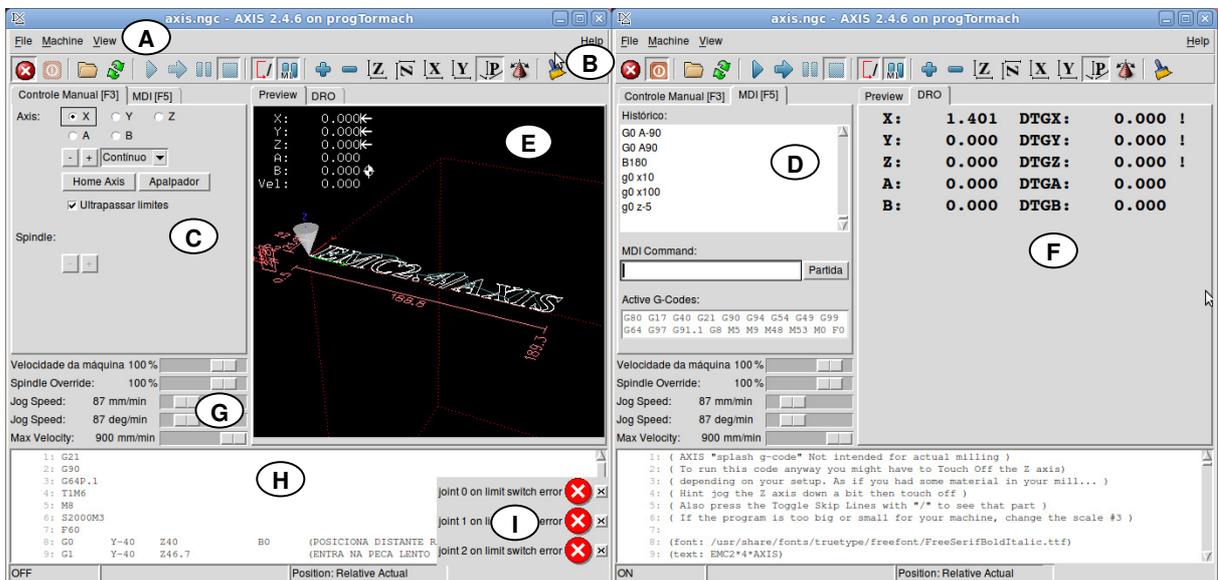


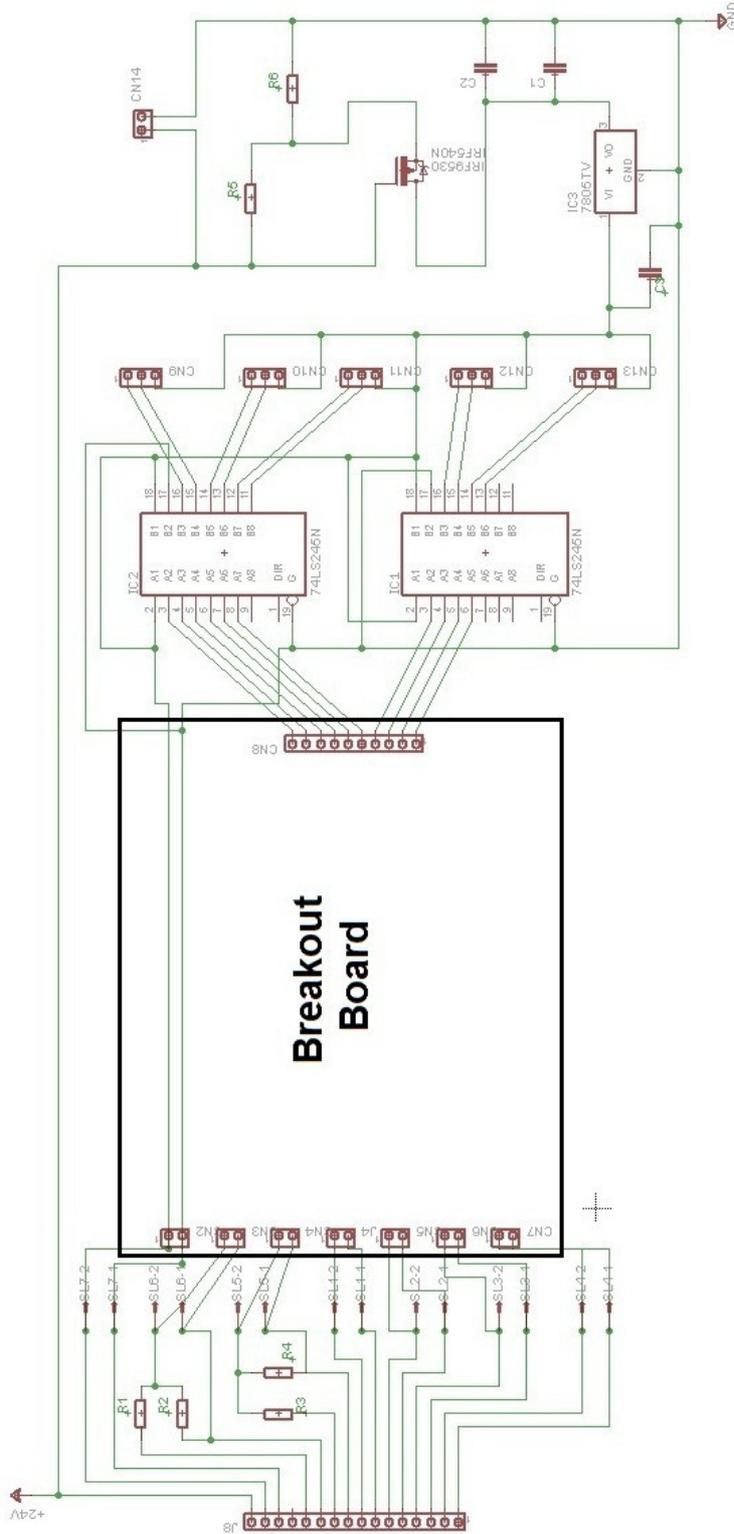
Figura A21 – Detalhamento da tela inicial do EMC2

Fonte: Autoria Própria.

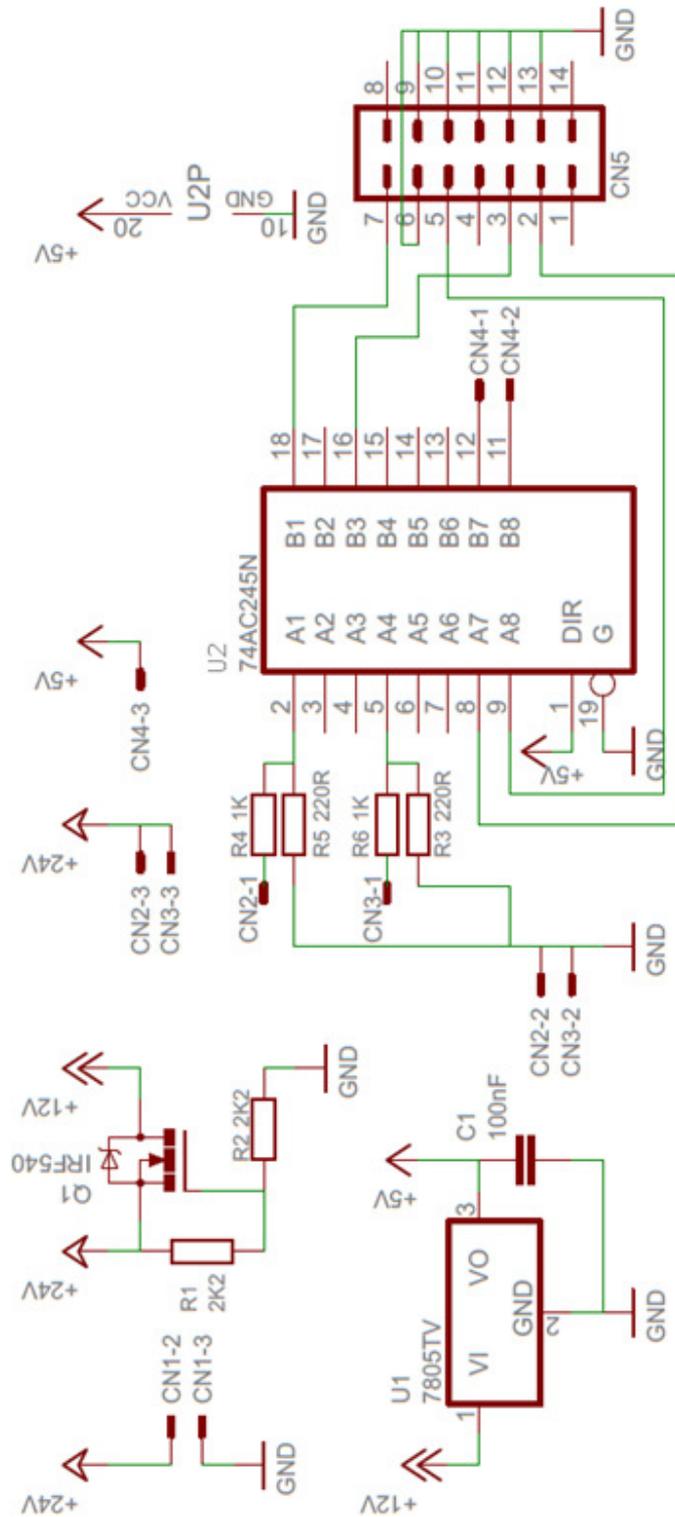
- A. Menus de funcionalidades da máquina;
- B. Atalhos para principais funcionalidades;

- C. Controle manual da máquina – opção para seleção do eixo, movimentação do eixo selecionado, busca do sensor *home* do eixo selecionado e opção para acionar a máquina quando o eixo chegou ao sensor fim de curso;
  - D. Controle da máquina através de comandos inseridos manualmente;
  - E. Informações de condições dos eixos – eixos X, Y e Z indica que estão no sensor fim de curso e eixo B indica que já foi referenciado –, percurso e posicionamento da ferramenta;
  - F. Informações de posicionamento dos eixos;
  - G. Controle analógico para velocidades;
  - H. Código G carregado;
  - I. Janelas de erro – Indicando que os sensores fim de curso dos eixos 0, 1 e 2 estão acionados.
- 4- Deve-se então carregar o código G através do *menu File>Open* ou *File>Recent Files* e localizar o programa, liberar o *Botão emergência* e acionar *Liga*, referenciar os eixos e acionar *Play* para iniciar a usinagem.

### APÊNDICE B – ESQUEMA ELÉTRICO DA PLACA AMPLIFICADORA

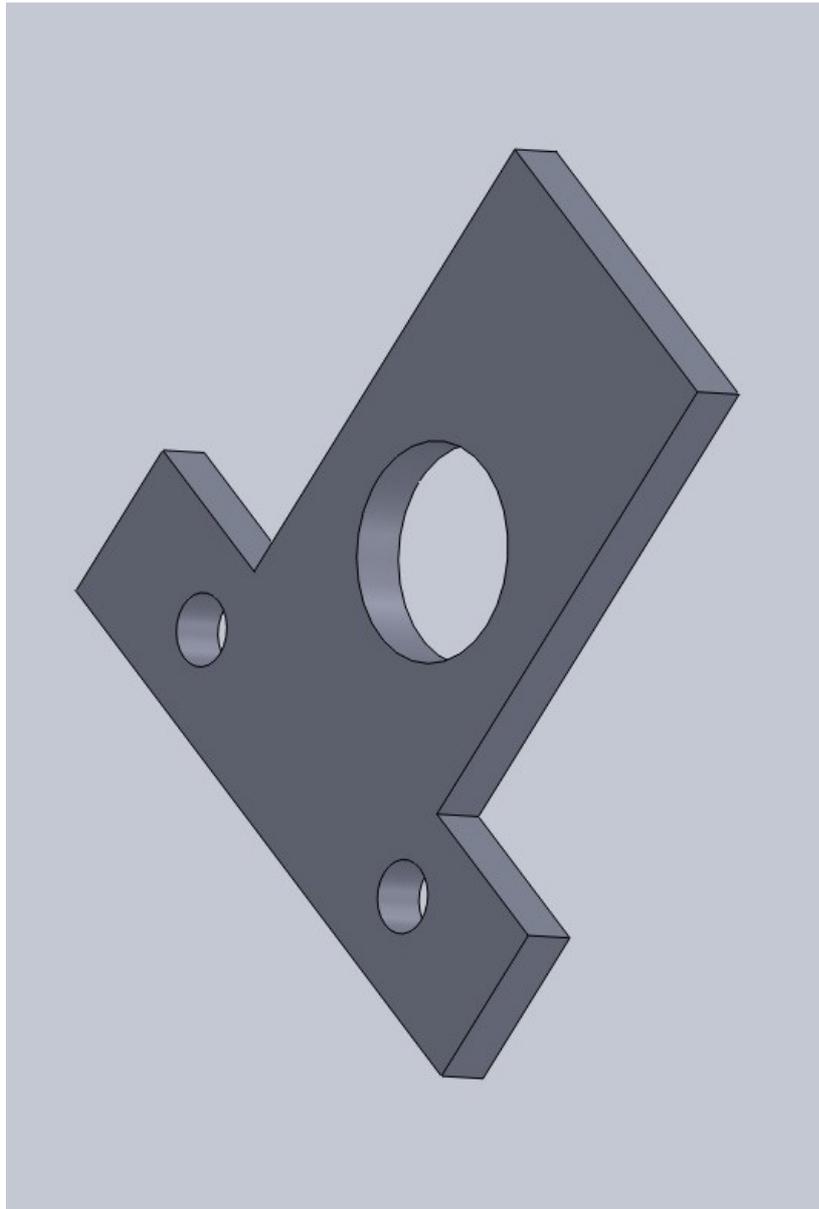


## APÊNDICE C – ESQUEMA ELÉTRICO DA PLACA ADAPTADORA



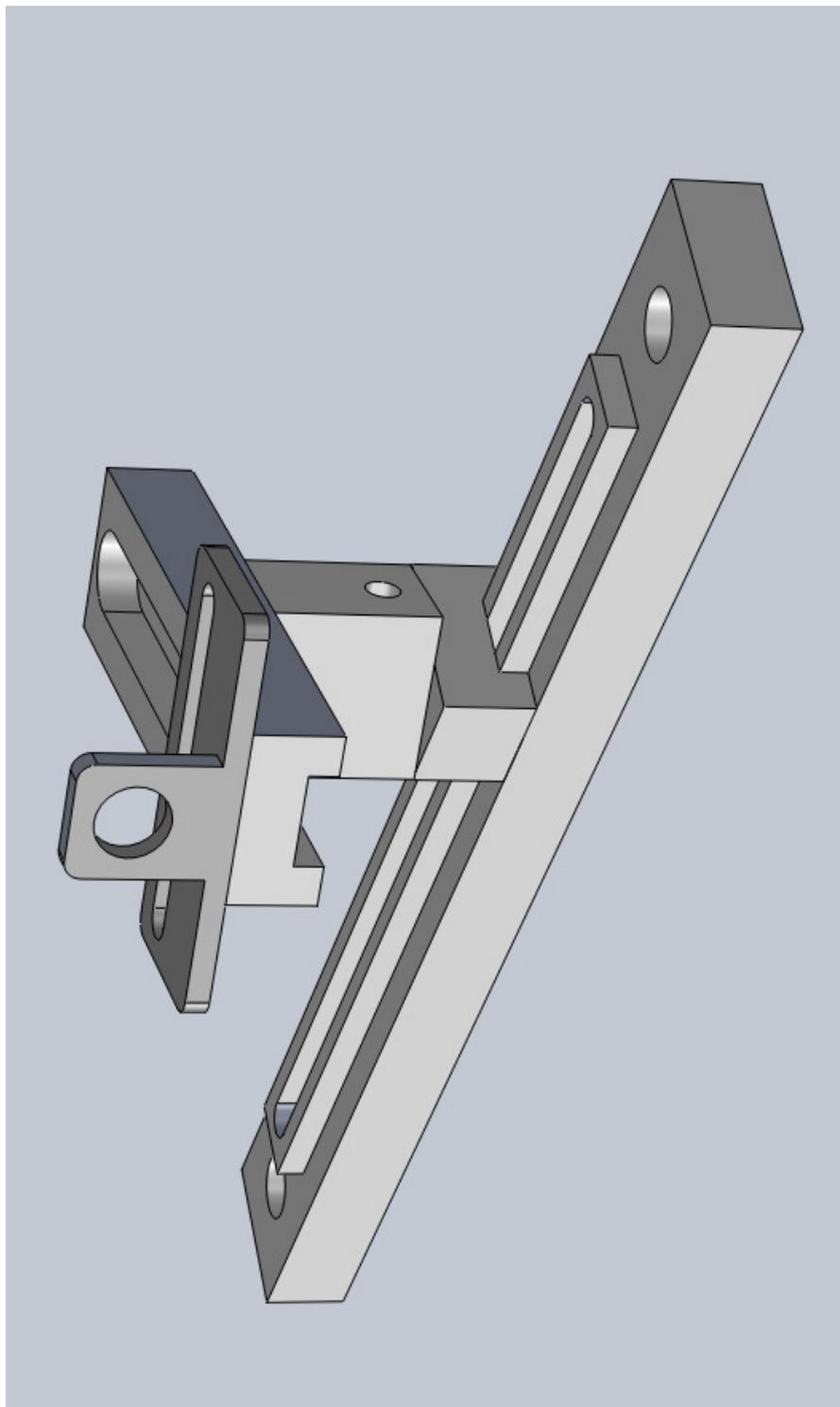
## APÊNDICE D – PEÇAS MODELADAS

Os desenhos das peças, utilizadas como suportes e o próprio desenho das máquinas, tem por intenção apenas a mera ilustração, uma vez que foram desenvolvidas exclusivamente para possibilitar a execução dos testes de conceito deste projeto.



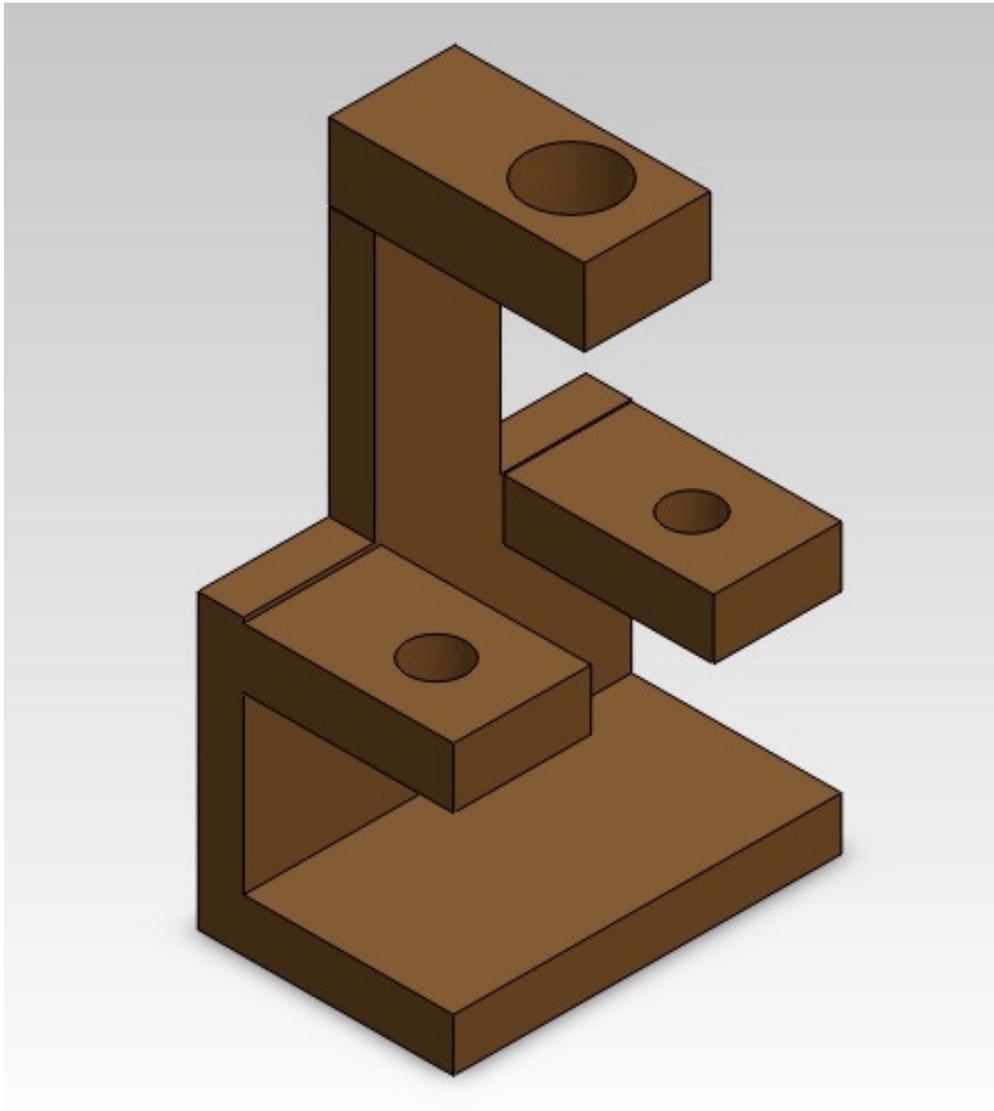
**Figura D1 – Suporte do sensor do eixo C**

**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura D2 – Suporte do sensor do eixo A – Bancada experimental**

**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura D3 – Suporte do Sensor do Eixo A – Tormach**

**Fonte: Autoria Própria.**

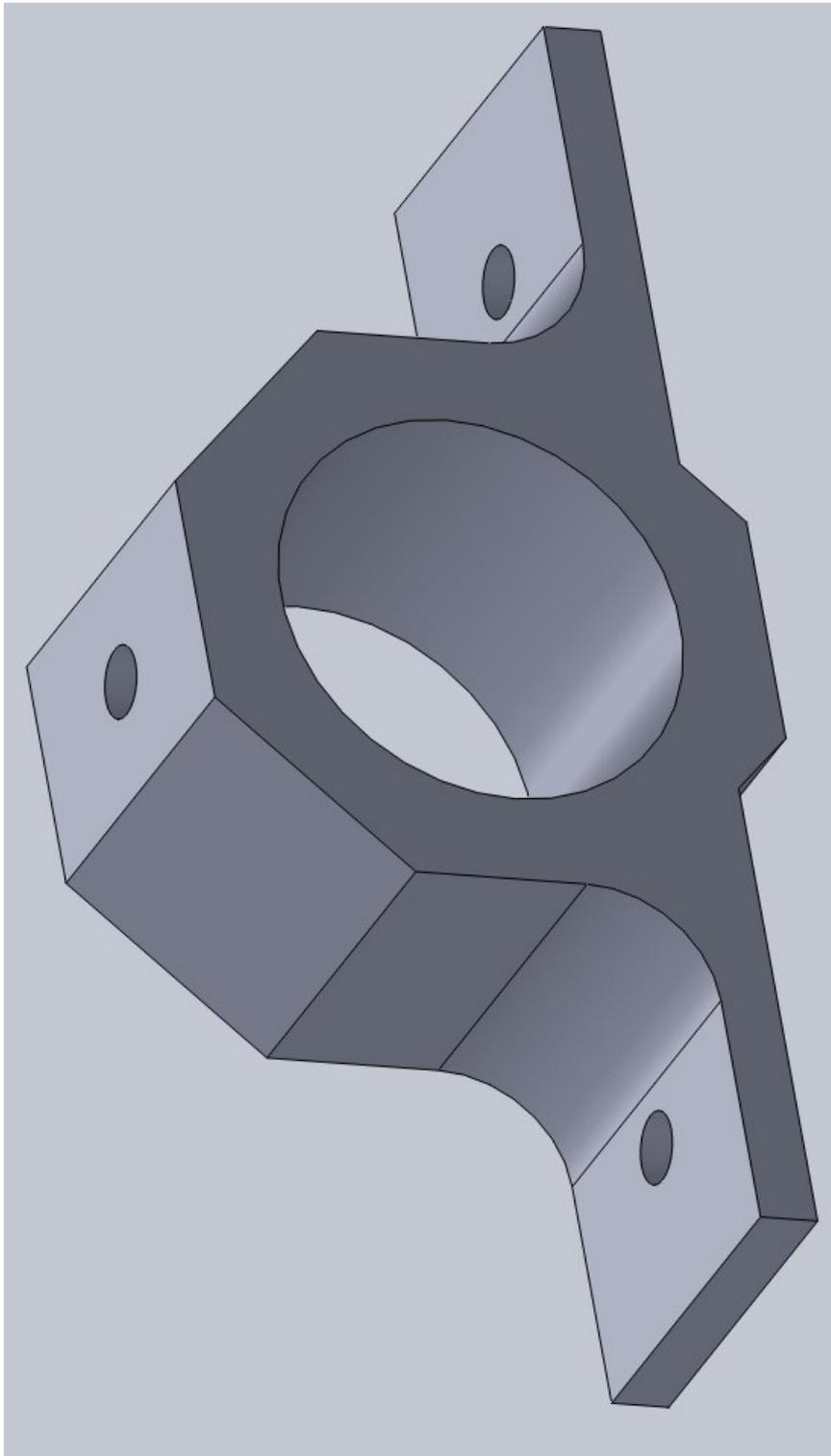
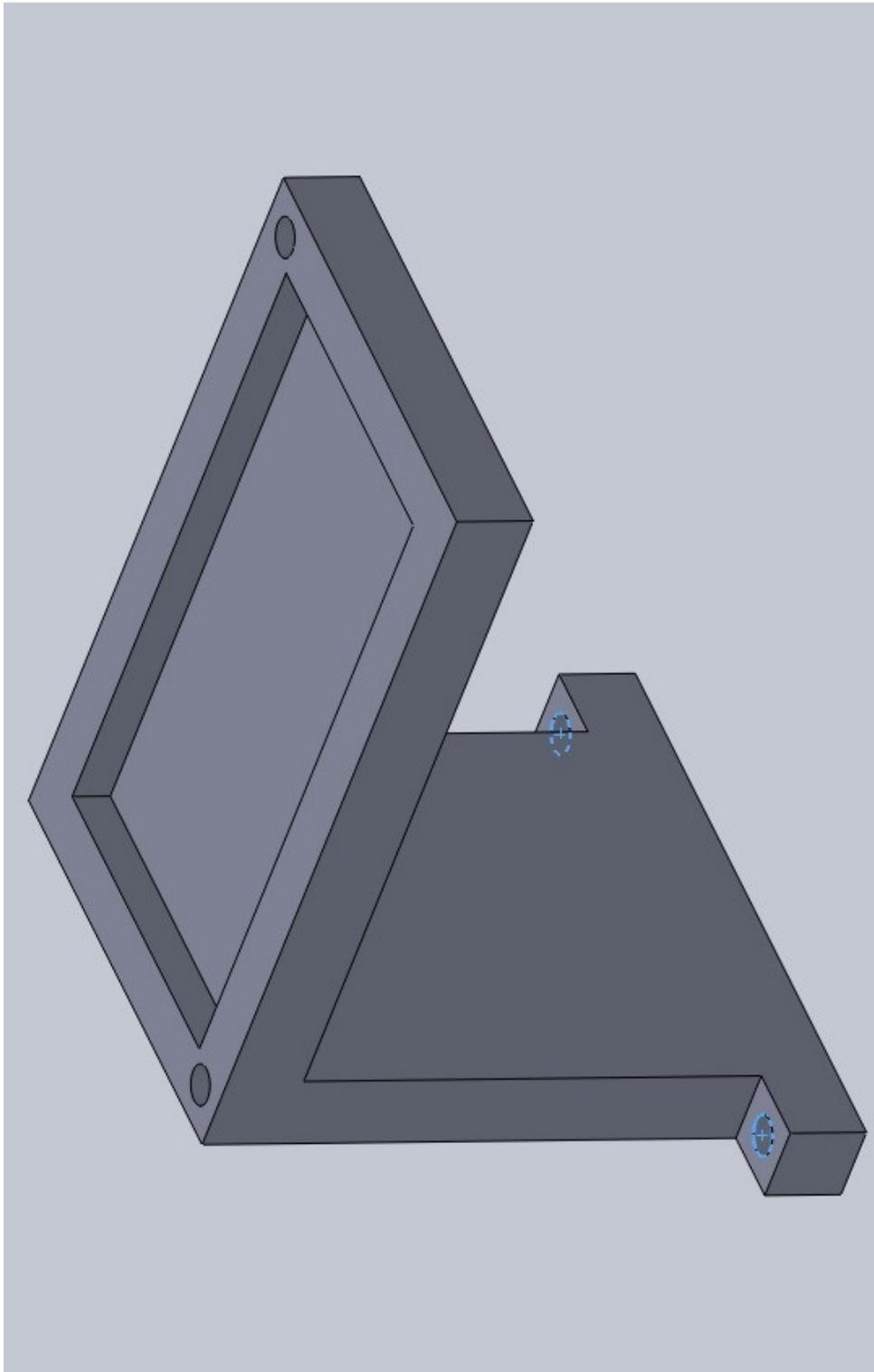


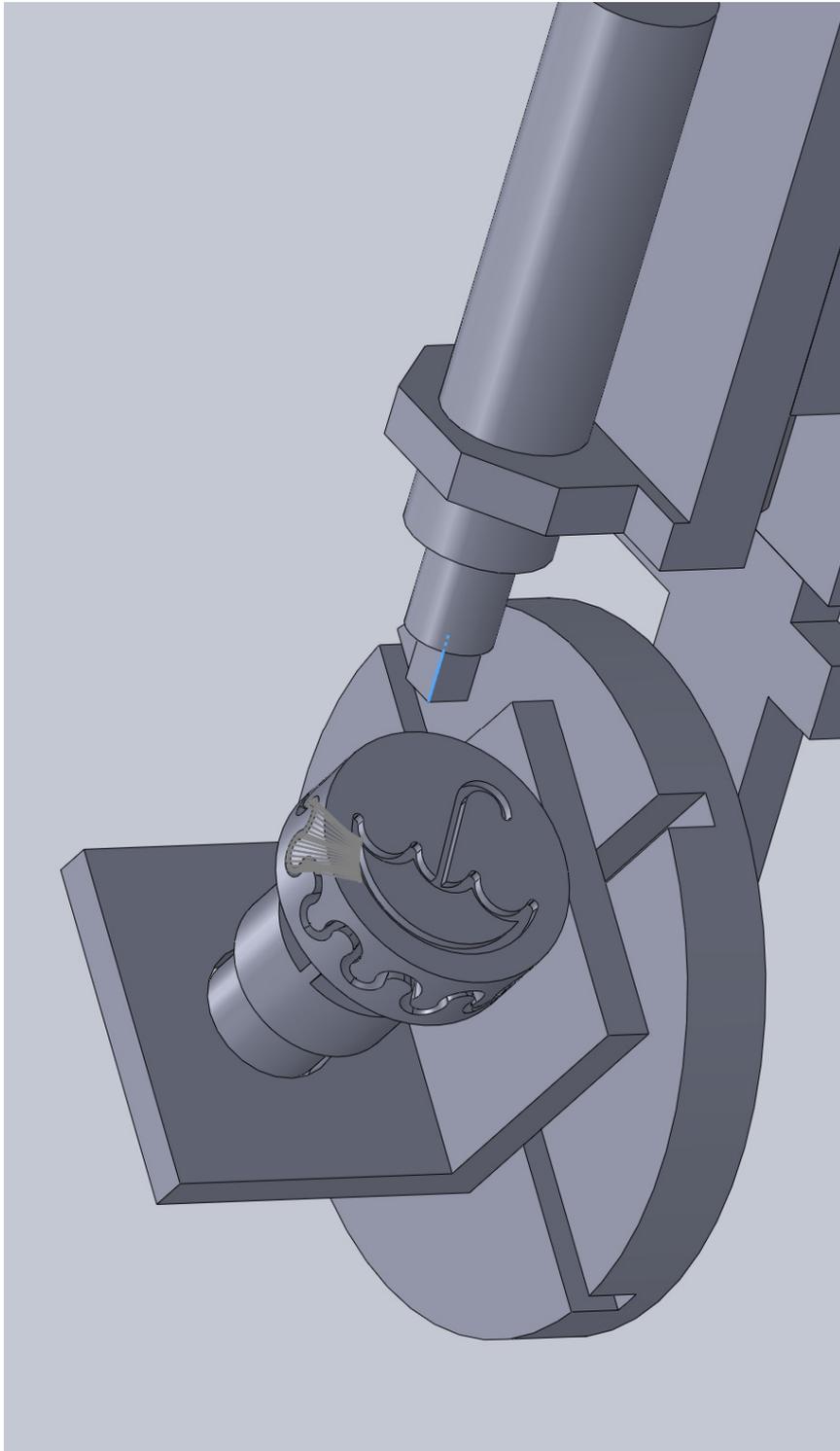
Figura D4 – Suporte *Spindle*

Fonte: Autoria Própria.



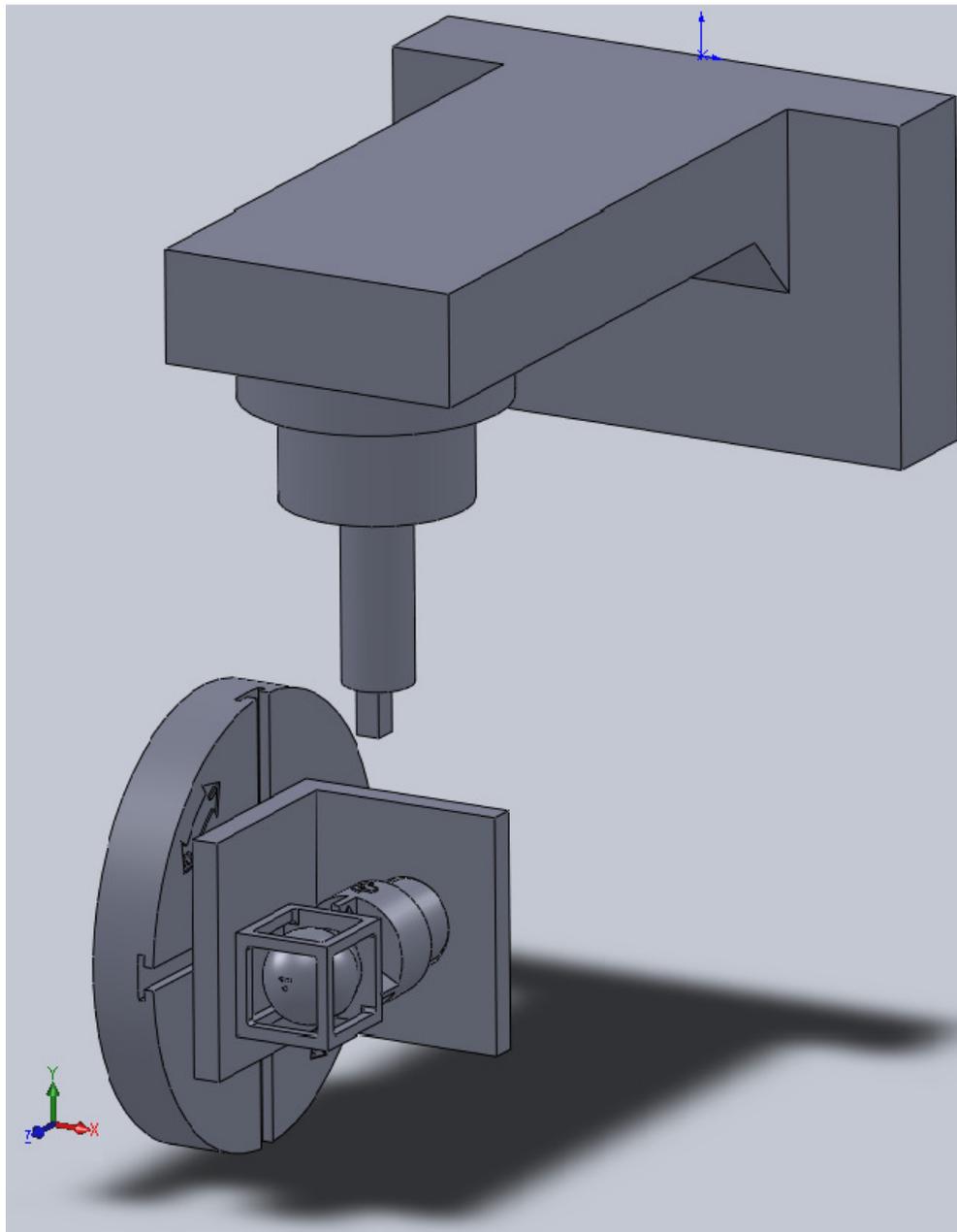
**Figura D5 – Suporte Placa Adaptadora**

**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura D6 – Desenho Bancada Experimental para Elaboração do Código G**

**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura D7 – Desenho Tormach para Elaboração do Código G**

**Fonte: Autoria Própria.**

## APÊNDICE E – CÓDIGO G FACEAMENTO – BANCADA EXPERIMENTAL

G21 (PROGRAMAÇÃO EM SISTEMA INTERNACIONAL - MÉTRICO)  
 G90 (POSICIONAMENTO ABSOLUTO)  
 S2000M3 (VELOCIDADE DE CORTE EM M/MIN, SENTIDO HORÁRIO)  
 F60 (AVANÇO DE CORTE)

### (FACEAMENTO FRONTAL)

G0 Y-40 Z40 C0 (POSICIONA DISTANTE RAPIDO FRONTAL)  
 G1 Y-40 Z46 (ENTRA NA PECA LENTO - AVANÇO1)  
 G1 Y0 C5760  
 G1 Z40 (DISTANCIA E ENCERRA)

### (FACEAMENTO LATERAL)

G0 Y0 Z0  
 G0 A90  
 G0 Y-79 Z80 C4608 (POSICIONA DISTANTE RAPIDO LATERAL)  
 G1 Z84.2 (ENTRA NA PECA LENTO - AVANÇO1)  
 G1 Y-47 C0 (B RODA 4608)  
 G1 Z84.6 (ENTRA NA PECA LENTO - AVANÇO2)  
 G1 Y-79 C4608 (B RODA 4608)  
 G1 Z84.8 (ENTRA NA PECA LENTO - AVANÇO3)  
 G1 Y-47 C0 (B RODA 4608)  
 G1 Z80 (DISTANCIA)  
 G0 Z50 (DISTANCIA E ENCERRA)

G28 (RETORNA PARA ZERO)  
 M30 (FIM DE PROGRAMA)

## APÊNDICE F – CÓDIGO G GUARDA-CHUVA – BANCADA EXPERIMENTAL

G21 (PROGRAMAÇÃO EM SISTEMA INTERNACIONAL - MÉTRICO)

G90 (POSICIONAMENTO ABSOLUTO)

S2000M3 (VELOCIDADE DE CORTE EM M/MIN, SENTIDO HORÁRIO)

F150 (AVANÇO DE CORTE)

G0	Y27.25	Z43	A0	C0	(POSICIONA DISTANTE RAPIDO)
G1		Z47.1			(ENTRA NA PEÇA)
G1	Y27.24			C180	(AVANÇO1 - CÍRCULO MAIOR)
G1	Y27.24			C178.97	(AVANÇO1 - PRIMEIRO CÍRCULO MENOR)
	Y27.17			C176.90	
	Y27.03			C174.84	
	Y26.81			C172.80	
	Y26.53			C170.77	
	Y26.18			C168.77	
	Y25.76			C166.81	
	Y25.27			C164.88	
	Y24.72			C163.01	
	Y24.11			C161.19	
	Y23.44			C159.44	
	Y22.71			C157.78	
	Y21.94			C156.21	
	Y21.11			C154.75	
	Y20.25			C153.43	
	Y19.34			C152.28	
	Y18.40			C151.32	
	Y17.44			C150.58	
	Y16.45			C150.13	
	Y15.46			C150.01	
	Y14.47			C150.28	
	Y13.50			C151.05	
	Y12.55			C152.39	
	Y11.67			C154.42	
	Y10.86			C157.24	
	Y10.14			C160.94	
	Y9.57			C165.53	
	Y9.16			C170.93	
	Y8.95			C176.91	
	Y8.93			C180.00	
	Y8.92			C0.00	(AVANÇO1 - SEGUNDO CÍRCULO MENOR)
	Y9.03			C6.14	(AVANÇO1 - TERCEIRO CÍRCULO MENOR)
	Y9.34			C11.86	
	Y9.84			C16.88	
	Y10.49			C21.05	
	Y11.25			C24.22	
	Y12.11			C26.69	
	Y13.03			C28.36	
	Y14.00			C29.4	

	Y14.97		C29.94	
	Y15.97		C29.98	
	Y16.95		C29.68	
	Y17.93		C29.08	
	Y18.88		C28.23	
	Y19.81		C27.16	
	Y20.70		C25.95	
	Y21.54		C24.54	
	Y22.34		C23.02	
	Y23.09		C21.04	
	Y23.79		C19.69	
	Y24.43		C17.91	
	Y25.01		C16.06	
	Y25.53		C14.16	
	Y25.98		C12.20	
	Y26.37		C10.23	
	Y26.69		C8.22	
	Y26.94		C6.18	
	Y27.11		C4.13	
	Y27.22		C2.37	
	Y27.56		C0.00	
G1		Z43		(AFASTA FERRAMENTA)
G1	Y7.06		C90	(REPOSICIONAMENTO DO EIXO)
G1		Z47.1		(REAPROXIMA FERRAMENTA)
G1	Y-20.38			(AVANÇO1 - CABO GUARDA-CHUVA)
G1	Y-21.37		C89.75	(AVANÇO1 - DETALHE CABO GUARDA-CHUVA)
	Y-22.34		C89.17	
	Y-23.27		C88.30	
	Y-24.15		C87.18	
	Y-24.97		C85.87	
	Y-25.72		C84.38	
	Y-26.39		C82.76	
	Y-26.97		C81.02	
	Y-27.46		C79.18	
	Y-27.86		C77.28	
	Y-28.15		C75.32	
	Y-28.34		C73.33	
	Y-28.43		C71.32	
	Y-28.40		C69.30	
	Y-28.28		C67.29	
	Y-28.05		C65.31	
	Y-27.71		C63.38	
	Y-27.28		C61.50	
	Y-26.75		C59.70	
	Y-26.13		C58.00	
	Y-25.43		C56.43	
	Y-24.65		C55.01	
G28				(RETORNA PARA ZERO)
G0	C180			(POSICIONA GUARDA-CHUVA NA VERTICAL)
M30				(FIM DE PROGRAMA)

## APÊNDICE G – CÓDIGO G USINAGEM LATERAL – BANCADA EXPERIMENTAL

G21 (PROGRAMAÇÃO EM SISTEMA INTERNACIONAL - MÉTRICO)	Y50.58 Z56.67 A-69.80 C27.57 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C30.00
G90 (POSICIONAMENTO ABSOLUTO)	
S2000M3 (VELOCIDADE DE CORTE EM M/MIN, SENTIDO HORÁRIO)	(SEGUNDO 1/12 DO CONTORNO)
F100 (AVANÇO DE CORTE)	G1
	Y50.58 Z56.67 A-69.81 C32.43 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C34.62 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C36.38 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C37.52 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C37.92 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C37.50 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C37.08 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C37.48 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C38.62 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C40.38 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C42.57 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C45.00 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C47.43 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C49.62 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C51.38 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C52.52 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C52.92 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C52.50 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C52.08 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C52.48 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C53.62 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C55.38 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C57.57 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C60.00
G0	
Y50.04 Z0 A-69.05 C0	
Z44	
(PRIMEIRO 1/12 DO CONTORNO)	
G1	
Y50.04 Z55.80 A-69.05 C0	
Y50.58 Z56.67 A-69.81 C2.43	
Y52.04 Z58.71 A-71.94 C4.62	
Y54.20 Z62.20 A-75.32 C6.38	
Y56.72 Z66.80 A-79.75 C7.52	
Y59.20 Z72.17 A-84.83 C7.92	
Y61.26 Z77.70 A-90.00 C7.50	
Y62.81 Z83.24 A-95.17 C7.08	
Y63.82 Z88.67 A-100.24 C7.48	
Y64.30 Z90.00 A-104.66 C8.62	
Y64.41 Z90.00 A-108.06 C10.38	
Y64.37 Z90.00 A-110.20 C12.57	
Y64.34 Z90.00 A-110.95 C15.00	
Y64.37 Z90.00 A-110.20 C17.43	
Y64.41 Z90.00 A-108.06 C19.62	
Y64.30 Z90.00 A-104.66 C21.38	
Y63.82 Z88.67 A-100.24 C22.52	
Y62.81 Z83.24 A-95.17 C22.92	
Y61.26 Z77.70 A-90.00 C22.50	
Y59.20 Z72.17 A-84.83 C22.08	
Y56.73 Z66.80 A-79.76 C22.48	
Y54.20 Z62.20 A-75.34 C23.62	
Y52.05 Z58.71 A-71.94 C25.38	
	(TERCEIRO 1/12 DO CONTORNO)
	G1
	Y50.58 Z56.67 A-69.81 C62.43 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C64.62 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C66.38 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C67.52

Y59.20 Z72.17 A-84.83 C67.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C67.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C67.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C67.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C68.62  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C70.38  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C72.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C75.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C77.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C79.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C81.38  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C82.52  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C82.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C82.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C82.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C82.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C83.62  
 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C85.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C87.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C90.00

## (QUARTO 1/12 DO CONTORNO)

G1

Y50.58 Z56.67 A-69.81 C92.43  
 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C94.62  
 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C96.38  
 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C97.52  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C97.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C97.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C97.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C97.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C98.62  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C100.38  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C102.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C105.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C107.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C109.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C111.38

Y63.82 Z88.67 A-100.24 C112.52  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C112.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C112.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C112.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C112.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C113.62  
 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C115.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C117.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C120.00

## (QUINTO 1/12 DO CONTORNO)

G1

Y50.58 Z56.67 A-69.81 C122.43  
 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C124.62  
 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C126.38  
 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C127.52  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C127.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C127.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C127.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C127.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C128.62  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C130.38  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C132.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C135.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C137.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C139.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C141.38  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C142.52  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C142.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C142.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C142.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C142.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C143.62  
 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C145.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C147.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C150.00

## (SEXTO 1/12 DO CONTORNO)

G1

Y50.58 Z56.67 A-69.81 C152.43  
 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C154.62  
 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C156.38  
 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C157.52  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C157.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C157.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C157.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C157.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C158.62  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C160.38  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C162.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C165.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C167.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C169.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C171.38  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C172.52  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C172.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C172.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C172.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C172.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C173.62  
 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C175.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C177.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C180.00

(SETIMO 1/12 DO CONTORNO)

G1

Y50.58 Z56.67 A-69.81 C182.43  
 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C184.62  
 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C186.38  
 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C187.52  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C187.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C187.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C187.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C187.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C188.62  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C190.38

Y64.37 Z90.00 A-110.20 C192.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C195.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C197.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C199.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C201.38  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C202.52  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C202.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C202.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C202.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C202.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C203.62  
 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C205.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C207.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C210.00

(OITAVO 1/12 DO CONTORNO)

G1

Y50.58 Z56.67 A-69.81 C212.43  
 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C214.62  
 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C216.38  
 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C217.52  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C217.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C217.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C217.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C217.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C218.62  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C220.38  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C222.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C225.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C227.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C229.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C231.38  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C232.52  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C232.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C232.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C232.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C232.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C233.62

Y52.05 Z58.71 A-71.94 C235.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C237.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C240.00

(NONO 1/12 DO CONTORNO)

G1

Y50.58 Z56.67 A-69.81 C242.43  
 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C244.62  
 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C246.38  
 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C247.52  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C247.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C247.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C247.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C247.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C248.62  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C250.38  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C252.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C255.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C257.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C259.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C261.38  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C262.52  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C262.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C262.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C262.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C262.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C263.62  
 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C265.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C267.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C270.00

(DÉCIMO 1/12 DO CONTORNO)

G1

Y50.58 Z56.67 A-69.81 C272.43  
 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C274.62  
 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C276.38  
 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C277.52  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C277.92

Y61.26 Z77.70 A-90.00 C277.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C277.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C277.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C278.62  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C280.38  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C282.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C285.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C287.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C289.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C291.38  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C292.52  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C292.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C292.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C292.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C292.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C293.62  
 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C295.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C297.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C300.00

(DÉCIMO PRIMEIRO 1/12 DO CONTORNO)

G1

Y50.58 Z56.67 A-69.81 C302.43  
 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C304.62  
 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C306.38  
 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C307.52  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C307.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C307.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C307.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C307.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C308.62  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C310.38  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C312.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C315.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C317.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C319.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C321.38  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C322.52

Y62.81 Z83.24 A-95.17 C322.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C322.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C322.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C322.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C323.62  
 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C325.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C327.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C330.00

(DÉCIMO SEGUNDO 1/12 DO CONTORNO)

G1

Y50.58 Z56.67 A-69.81 C332.43  
 Y52.04 Z58.71 A-71.94 C334.62  
 Y54.20 Z62.20 A-75.32 C336.38  
 Y56.72 Z66.80 A-79.75 C337.52  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C337.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C337.50  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C337.08  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C337.48  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C338.62

Y64.41 Z90.00 A-108.06 C340.38  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C342.57  
 Y64.34 Z90.00 A-110.95 C345.00  
 Y64.37 Z90.00 A-110.20 C347.43  
 Y64.41 Z90.00 A-108.06 C349.62  
 Y64.30 Z90.00 A-104.66 C351.38  
 Y63.82 Z88.67 A-100.24 C352.52  
 Y62.81 Z83.24 A-95.17 C352.92  
 Y61.26 Z77.70 A-90.00 C352.50  
 Y59.20 Z72.17 A-84.83 C352.08  
 Y56.73 Z66.80 A-79.76 C352.48  
 Y54.20 Z62.20 A-75.34 C353.62  
 Y52.05 Z58.71 A-71.94 C355.38  
 Y50.58 Z56.67 A-69.80 C357.57  
 Y50.04 Z55.80 A-69.05 C360.00

G0 Z0 (RECUA Z)  
 G28 (RETORNA PARA ZERO)  
 M30 (FIM DE PROGRAMA)