

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

HENRIQUE MUNIZ DE SOUZA
henriquemunizs@gmail.com
NUSP 7210251

Orientador
PROF. DR. JULIO CEZAR ADAMOWSKI
jcadamow@usp.br

Fresadora CNC de três eixos para confecção de modelos de embarcação

São Paulo
2015

HENRIQUE MUNIZ DE SOUZA

Fresadora CNC de três eixos para confecção de modelos de embarcação

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
graduação em Engenharia Mecatrônica

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Julio Cezar
Adamowski

São Paulo
2014

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski, por toda ajuda dada. Sua paciência em explicar qualquer conceito, sua orientação precisa e seu incentivo nos momentos mais difíceis foram fundamentais para a realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Bernardo de Andrade, por sua atenção e prontidão em ajudar a todo momento, principalmente com as compras dos materiais, que foram críticos para que o projeto fosse viável.

À minha família, que foi minha base durante toda a vida e que sem eles, nada seria possível. À minha namorada, por todo o apoio dado, em todos os momentos.

Aos técnicos dos laboratórios do PMR, principalmente ao Adilson e ao Gilberto, que sempre foram solícitos e me ajudaram com a maior boa vontade do mundo. Também agradeço ao técnico Rodolfo do LabRisco pela ajuda com o LinuxCNC.

Ao meu primo Lucas, por toda ajuda técnica e por discutir comigo algumas ideias e ser a dupla que não tive nesse trabalho. Ao colega Rafael, pela sua grande ajuda com a montagem do gabinete.

Aos amigos, por me apoiarem incansavelmente e testemunharem todos os momentos desse trabalho.

Aos ex-alunos Eduardo e Otávio, que iniciaram esse trabalho, por toda a ajuda prestada e pela prontidão em dividir o conteúdo e conhecimento sobre o tema.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo ensino dado ao longo do curso e pela estrutura disponibilizada para realização do trabalho. Ao Departamento de Engenharia Mecatrônica, por todo apoio intelectual e importante participação na minha formação acadêmica.

Às empresas que apoiaram o projeto de alguma forma, citadas ao longo da monografia.

FRESADORA CNC DE TRÊS EIXOS PARA CONFECÇÃO DE MODELOS DE EMBARCAÇÕES

Henrique Muniz de Souza
 henriquemunizs@gmail.com
 7210251

Orientador
 Prof. Dr. Julio Cesar Adamowski
jcadamow@usp.br

RESUMO

O projeto consiste em uma fresadora CNC (Computer Numerical Control) de três eixos (sendo os de três translação) para confecção de modelos de embarcações. A utilização de modelos é crucial no estudo de embarcações, principalmente pela importância do método experimental na análise de diversos parâmetros como, por exemplo, a força de arrasto. Entretanto, adquirir máquinas profissionais para essa aplicação possui custos não justificáveis e máquinas fabricadas por "hobbistas" não atendem simultaneamente os requisitos de precisão, volume de trabalho e velocidade, sugerindo a fabricação de uma máquina orientada para esse fim como alternativa para o problema. A fresadora construída será utilizada para usinar blocos de poliuretano (ou outro material mole semelhante) que serão posteriormente unidos, formando o modelo final de uma embarcação. A máquina possuirá volume de trabalho de 900 mm x 700 mm x 500 mm, velocidade de avanço de 250 mm/s, aceleração máxima de 5 m/s² e precisão mínima de 0,1 mm para permitir a construção de modelos de tamanho adequado, com rapidez e precisão. A primeira etapa do projeto será uma revisão do projeto mecânico, já realizado por outro trabalho de conclusão de curso do departamento. Em seguida, a especificação do hardware de controle e a implementação do controlador através de software serão esquematizadas. Posteriormente, será realizada a montagem física da máquina pela fixação de guias, fusos, mancais e atuadores. Guias lineares e fusos de esferas recirculantes serão utilizados nos três eixos. Os três atuadores serão servo-motores brushless que acionarão diretamente os fusos e funcionarão em malha fechada para garantir a precisão, mesmo com a variação de cargas e esforços impostos na estrutura da máquina. O acionamento dos motores será feito através do software Linux CNC que enviará sinais pela porta paralela do computador até os drivers dos motores. Feita a integração dos subsistemas, iniciaremos a fase de testes e, eventualmente, serão propostas melhorias. Paralelamente, será feita a integração do projeto com um projeto do departamento de engenharia naval que faz a representação de modelos de embarcações em CAD, após o estudo da configuração do casco utilizando softwares CFD (Computational Fluid Dynamics). Por último, a máquina deve ser de fácil utilização, possuindo gabinete de controle, manual de operação e dispositivos básicos de segurança.

Palavras-chave: CNC, fresadora, modelos, poliuretano, embarcações

A THREE AXIS CNC MILLING MACHINE DESIGNED TO BUILD BOAT MODELS

Henrique Muniz de Souza
henriquemunizs@gmail.com
7210251

Advisor
Prof. Dr. Julio Cezar Adamowski
jcadamow@usp.br

ABSTRACT

The Project is a three axis CNC (computer numerical control) milling machine to build boat models by machining polyurethane pieces. Model applications are very important in the study of boat characteristics, mainly because experimental methods are crucial during analysis of boat's parameters like stability and response to drag forces. However, it is very expensive to buy a professional milling machine only for this use and hobby-machines don't have, simultaneously, precision, velocity and size of work necessary to this application, suggesting that a machine build mainly for this goal is the best approach for this problem. The milling machine will machine polyurethane pieces that will be merged to produce a boat model. The machine's work size will be (900 mm x 700 mm x 500 mm), its maximum velocity will be 250 mm/s, its maximum acceleration will be 5 m/s² and its minimum precision will be 0,1 mm to allow fast and precise construction of the models, with a proper size. The first step of the project will be a review of the mechanical project that has already been developed by another graduation thesis of this department. The second step will be the specification of electronic drivers, connections and sensors. Also, the implementation of the machine's control will be schematized. After that, the machine's physical structure will be mounted by the fixation of ballscrews, bearings, linear guides, motors and sensors. All three axis will be mounted with linear guides and ballscrews. All the motors will be brushless motors that will drive ballscrew directly and will operate in a closed-loop system to secure precision, even with load and external forces variations. The motors will be activated with a software called LinuxCNC that will send signals by the parallel port to each motor's driver. After integrating mechanical, electronic and control systems we are going to start a phase test until the expected results be achieved. At the same time, this project will be integrated with another project of the university that will represent boat models in a CAD, after analyzing the best configuration for the boat hull using a CFD (computational fluid dynamics) software. Also, the machine is expected to be easy to operate, so it will include a control cabinet, an user's manual and basic safety devices.

Keywords: CNC, milling, models, polyurethane, boats

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	OBJETIVO	10
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1.	USINAGEM.....	11
3.1.1.	FRESAMENTO.....	11
3.2.	POLIURETANO.....	12
3.2.1.	APLICAÇÕES	13
3.3.	MODELOS DE EMBARCAÇÕES.....	14
3.4.	ESTADO DA ARTE	14
4.	DESENVOLVIMENTO.....	17
4.1.	REQUISITOS.....	17
4.1.1.	VOLUME DE TRABALHO.....	17
4.1.2.	VELOCIDADE DE AVANÇO	17
4.1.3.	MÁXIMA ACELERAÇÃO	17
4.2.	RESUMO DO PROJETO MECÂNICO.....	18
4.2.1.	SOLUÇÃO PROPOSTA.....	18
4.2.2.	DIMENSIONAMENTO	19
4.3.	REVISÃO DO PROJETO MECÂNICO	26
4.3.1.	REVISÃO DO DIMENSIONAMENTO	26
4.3.2.	REVISÃO DO PROJETO MECÂNICO	27
4.4.	SOFTWARE LINUX CNC	27
4.4.1.	INTRODUÇÃO.....	28
4.4.2.	REQUISITOS MÍNIMOS.....	28
4.4.3.	PORTA PARALELA.....	29
4.5.	SIMULAÇÃO DE USINAGEM NO LINUX CNC.....	32
4.5.1.	CONFIGURAÇÃO DO COMPUTADOR DISPONÍVEL.....	32
4.5.2.	RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DO LINUXCNC	33
4.5.3.	SIMULAÇÃO	34
4.5.4.	OBTENÇÃO DO CÓDIGO G	38
4.6.	ELETRÔNICA	45
4.6.1.	INTEGRAÇÃO ENTRE MOTORES, DRIVERS E CONTROLADOR	45
4.7.	PROCESSO DE COMPRA DOS MATERIAIS E CUSTO TOTAL DO PROJETO	56
4.8.	PROCESSO DE MONTAGEM DA MÁQUINA	58
4.9.	RESULTADOS.....	62
4.9.1.	PRIMEIROS TESTES	62
4.9.2.	CONFECÇÃO DO BARCO DA EQUIPE POLI NAÚTICO	63

5.	CONCLUSÃO	66
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
7.	ANEXOS	71
7.1.	CIRCUITO BASE	Erro! Indicador não definido.
7.2.	CÓDIGO G SIMULADO	Erro! Indicador não definido.
7.3.	DESENHOS DE CONJUNTO E FABRICAÇÃO	71

1. INTRODUÇÃO

A usinagem está presente na história humana desde os primórdios da civilização. As primeiras ferramentas eram operadas unicamente com a mão e eram constituídas de materiais relativamente simples. A primeira ferramenta documentada por muitas fontes é o “arco furador”, muito semelhante a um arco e flecha, onde a flecha possuía uma geometria para auxiliar a furação e era enrolada por um fio às extremidades do arco, assim, um movimento linear repetido possibilitava a confecção de furos. A ferramenta foi aprimorada e muito utilizada no Império Romano. [1]

A usinagem foi evoluindo gradativamente desde então e durante a revolução industrial começou a evoluir continuamente e rapidamente até os dias de hoje. O primeiro torno com molas foi construído no século XIII. Era acionado por um pedal, que provocava o movimento de rotação da peça. Ferramentas de usinagem eram manualmente forçadas contra o material para criar peças cilíndricas. Essa configuração possuía um problema que era o acionamento não contínuo da rotação da peça. Este problema foi resolvido utilizando uma roda motora acionada por tração humana ou animal, que posteriormente foi substituída por uma roda d’água. Mais tarde começou-se a utilizar vapor em seu acionamento. [1]

Em 1797, Henry Maudslay desenvolveu um torno com precisão suficiente para produzir roscas e outras geometrias com certa repetibilidade, permitindo a intercambialidade entre peças. Em 1818, Eli Whitney, famoso por inventar o descaroçador de algodão, inventou a **fresadora**, que produzia furos pela rotação de uma manivela movimentadora de engrenagens, que acionavam a ferramenta e faziam-na avançar na direção da peça. A máquina permitia a produção de superfícies planas de forma rápida e precisa quando comparada com os métodos da época. [1]

No início do século XX, a energia elétrica começou a ser utilizada e revolucionou o funcionamento de fresadoras e outras máquinas-ferramenta, aumentando muito sua complexidade, precisão, velocidade e eficiência. Isto possibilitou um avanço significativo na produção de peças, que permitiu um desenvolvimento acelerado em diversos segmentos da indústria, inclusive o de fabricação de máquinas, estimulando muito a evolução do setor. [1]

Posteriormente, na metade do século, foi desenvolvido o controle numérico,

“numerical control” (NC), que através de um código “gravado” em um cartão perfurado, automaticamente guiava a máquina, permitindo sua utilização sem a necessidade de um operador. Por último, com o advento do computador, cartões perfurados foram substituídos por códigos computacionais que são compilados e controlam a ação da máquina. Com isso temos o “computer numeric control” (CNC). [1]

Atualmente o papel da usinagem e, consequentemente, o uso de máquinas-ferramenta, especialmente a fresadora, é extremamente presente no dia-a-dia. Suas aplicações estão em várias indústrias, como aviação, automobilística, naval e outras, e por esses motivos, a usinagem é um processo essencial para a humanidade.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é a construção de uma fresadora CNC (*computer numeric control*) de três eixos, sendo os três eixos de translação, para confecção de modelos de embarcações.

A máquina usinará blocos de poliuretano, ou outro material mole com características semelhantes, que serão unidos para formação dos modelos finais das embarcações. Os requisitos da máquina, decididos previamente em reunião com o grupo participante do projeto do departamento de engenharia naval [2], são:

- Volume de trabalho: 900 mm x 700 mm x 500 mm
- Velocidade de avanço: 250 mm/s
- Máxima aceleração: 5 mm/s

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. USINAGEM

De acordo com a norma DIN 8580, qualquer processo onde ocorre a remoção de material na forma de cavaco pode ser caracterizado como usinagem. Atualmente os processos de usinagem existentes são divididos entre processos convencionais e não convencionais. Entre os não convencionais podemos citar a eletroerosão, remoção por ultrassom, remoção por jato d'água e remoção térmica (laser). Os processos convencionais são divididos entre processos de geometria definida (torneamento, fresamento, furação, rosqueamento, alargamento e plainamento) e geometria não definida (retificação, polimento, lapidação, brunimento, lixamento e jateamento), de acordo com a ferramenta usada. [3]

3.1.1. FRESAMENTO

A operação de fresamento pode ser definida como o processo de corte intermitente, utilizando uma ferramenta cortadora com um ou mais dentes, através de movimentos lineares em direção à peça. No processo de fresamento convencional, a ferramenta de corte é presa em um *spindle*, a peça em uma mesa e um movimento linear relativo é aplicado entre a peça e ferramenta. [4]

Os principais tipos de fresamento podem ser definidos como fresamento de topo ou faceamento, fresamento frontal concordante e o fresamento frontal discordante. A operação de faceamento possui ângulos de saída e entrada de ferramenta diferentes de zero. O fresamento concordante possui ângulo de entrada diferente de zero e o ângulo de saída é zero. O fresamento discordante possui ângulo de saída zero e ângulo de entrada diferente de zero. O fresamento discordante é indicado para situações com condições que dificultem a remoção de material, enquanto o fresamento concordante é indicado para obter superfícies com melhor acabamento. Diferentemente do processo de torneamento, a remoção de cavaco não acontece de forma constante. [4]

3.1.1.1. FRESADORAS

As fresadoras são as máquinas que realizam o processo de fresamento. Suas configurações principais podem ser divididas entre fresadoras verticais e horizontais,

de acordo com a orientação do *spindle*. Em ambas, o *spindle* provoca a rotação da ferramenta e a peça é transladada até a ferramenta com o auxílio de guias e uma mesa. [1]

As fresadoras sem comando numérico possuem boa qualidade de usinagem, mas suas aplicações não envolvem geometrias complexas, limitando-as a processos de faceamento, rebaixo, furos e outros processos simples. A utilização de comando numérico permite a usinagem de formas muito complexas já com fresadoras convencionais de três eixos. O emprego de mais eixos e ferramentas variadas permite a fabricação de, virtualmente, qualquer peça que não possua cavidades complexas. [1]



Figura 1 – Fresadora CNC de cinco eixos realizando uma usinagem de formato complexo [5]

3.2. POLIURETANO

O poliuretano foi desenvolvido em 1937 por Otto Bayer. Sua composição é variável, podendo apresentar-se em formas rígidas, semi-rígidas e flexíveis. Sua densidade também varia, de acordo com a aplicação, mas normalmente está entre 8 e 60 (kg/m^3). [6]

Poliuretanos são polímeros com a presença de grupos uretanos em sua cadeia. As reações básicas para formação de poliuretanos envolvem reações de

poliadição de um poliisocianato em forma alifática e um composto com hidrogênio ativo (como por exemplo álcoois, polióis ou polióis poliésteres), e/ou outros reagentes (dependendo do material requerido). Seus compostos podem variar de acordo com a massa molecular, natureza química e funcionalidade. Isto permite variação nas propriedades da espuma, permitindo sua aplicação em diversas finalidades. [6] [7]

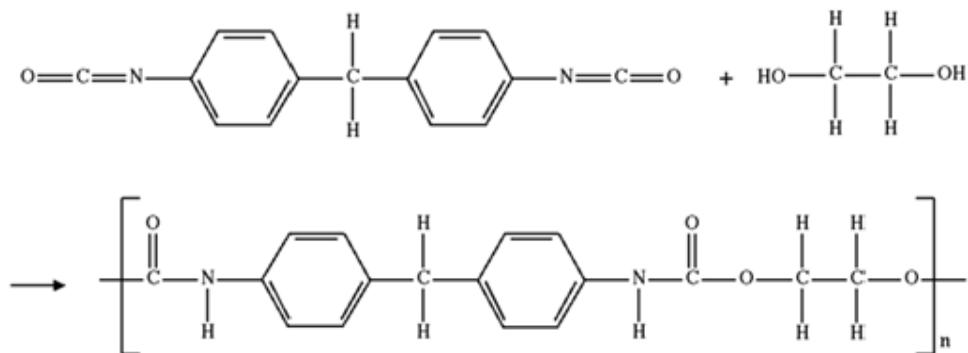


Figura 2 – Exemplo típico de reação de formação de um poliuretano [6]

Espumas rígidas de poliuretano são sintetizadas a partir de polióis polifuncionais, pois resulta em uma estrutura tridimensional emaranhada. Para espumas mais rígidas ainda, por exemplo as que são usadas na construção civil, o processo de síntese é feito com catalisadores de trimerização, que formam estruturas cíclicas no interior da matriz da espuma.

3.2.1. APLICAÇÕES

Dado sua particularidade e ampla variação em suas características, o poliuretano possui diversas aplicações. As espumas flexíveis são muito utilizadas em colchões, estofados e assentos automotivos. As espumas semirrígidas são utilizadas na indústria automotiva com descansa-braços, painéis e parachoque. As espumas rígidas são largamente utilizadas no isolamento térmico de geladeiras e freezers, mas também na engenharia civil em painéis divisórios. [8]

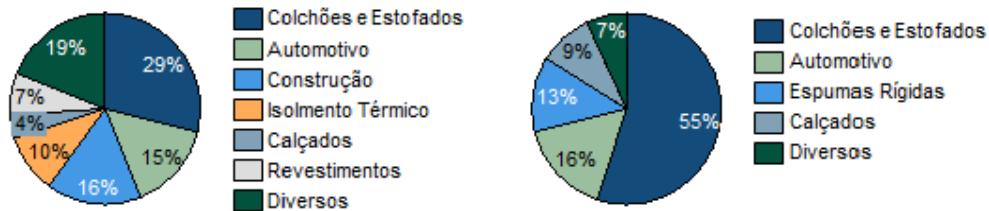


Figura 3 – Consumo Mundial de PU e Consumo Brasileiro de PU [8]

3.3. MODELOS DE EMBARCAÇÕES

Modelos de embarcações são barcos de tamanho reduzido que buscam reproduzir fielmente as características de um barco real. A complexidade envolvida no estudo das variáveis envolvidas durante a navegação, por si só, já representa um bom motivo para exemplificar a importância do estudo com modelos de escala reduzida. Além disso, a embarcação marítima é um produto de alto custo operacional, que será utilizado por muito tempo, portanto é importante buscar melhorias contínuas no desenvolvimento de embarcações, pois um pequeno aumento de eficiência, desempenho ou segurança, acabará resultando num grande ganho no futuro. [9]

3.4. ESTADO DA ARTE

Determinar estado da arte atual é uma tarefa crítica para alavancar conhecimento e direcionar os esforços do trabalho de maneira mais eficaz. Para determinar o estado da arte, foram utilizadas como ferramentas de pesquisa o IEEE Explore, Science Direct e o Google, nesta ordem, para priorização de fontes acadêmicas no trabalho.

O fim específico do projeto, que é a construção de uma máquina CNC contendo pelo menos três eixos de translação para confecção de modelos de embarcações em poliuretano foi procurado através das seguintes palavras chave:

“Milling machine” AND boat AND polyurethane – 28 resultados no Science Direct – 0 resultados IEEE Explore
 “Milling machine” AND ship AND polyurethane – 33 resultados no Science Direct – 0 resultados IEEE Explore

Tabela 1 – Palavras Chave utilizadas na busca

Os resultados encontrados com o grupo de palavras acima consistiam, em sua maioria, em fontes muito abrangentes de dados (compilação de trabalhos apresentados em um congresso, compilação de livros relacionados a um determinado assunto, etc) ou eram projetos que continham todos os termos da

busca, mas mesmo assim não eram diretamente relacionados com o tema, como em [10], onde durante a citação de referências, os termos “*milling machine*” and “*ship*” são citados, mas o trabalho dos autores não tem como tema o principal semelhante ao desse trabalho (*multi-point sandwich format of a spherical sector with tool-shape compensation*). Este fato indica que a produção de teses e artigos para esse fim específico ainda não foi explorada.

Entretanto, em uma pesquisa no Google podemos perceber que industrialmente o estado da arte é bem avançado, pois algumas companhias possuem produtos que são modelos de barcos feitos em poliuretano (ou outro material) com o uso de uma fresadora CNC de três ou mais eixos. A empresa FB Design utiliza uma fresadora CNC de cinco eixos com volume de trabalho de 24x6,5x3,5 (m) para a construção de modelos e até cascos finais de embarcações, dependendo do tamanho do produto final e necessidade do cliente [11]. Outra empresa que oferece soluções parecidas é a CMS [12]. A empresa Drew Simmonds Patterns Ltd. fabrica uma série de modelos de tamanho relativamente grande (em comparação ao tamanho de máquinas convencionais), em uma variedade de materiais moles, incluindo o poliuretano, através de fresadoras CNC [13]. Grandes partes de barcos são usinadas em fresadoras CNC fabricadas pela empresa ShopBot [14]. Estes exemplos demonstram que a existência de um mercado que necessita de modelos de embarcações, ou até embarcações prontas, feitos com precisão e rapidez, estimulou o desenvolvimento de máquinas CNC com essa finalidade.

Observando um fim menos específico, que é a utilização de fresadoras para usinagem de poliuretanos, conseguimos encontrar resultados relevantes no Sciece Direct. O resultado mais representativo é o estudo da usinabilidade do poliuretano utilizando uma máquina de corte ortogonal presente em [15], onde diversos pontos são analisados como a característica celular do poliuretano, e suas tendências de “escapar” da ferramenta de corte no início e sua tendência de “rasgar” ao final do corte. Outras teses encontradas na internet também apresentam pontos que devem ser considerados durante a usinagem de poliuretano como em [7], onde as dificuldades envolvidas na usinagem são explicitadas durante o processo de confecção de assentos de poliuretano personalizados e [6], onde um resumo das características gerais de poliuretanos são estudadas. Ainda podemos observar que alguns sites possuem extensa documentação sobre poliuretanos e suas

propriedades, com detalhes sobre sua usinabilidade como observado em [8] e [16].

Aspectos ainda mais amplos, como fresadoras CNC, modelos de embarcações ou até usinagem possuem estados de arte mais avançados, com fontes acadêmicas explorando diversos detalhes envolvidos em cada uma dessas áreas. Por exemplo, uma pesquisa no IEEE Explore sobre “*milling machines*” aponta que os últimos trabalhos no tema são relacionados com temas muito específicos dentro de fresadoras, como em [17] onde o efeito de geração de calor em fusos de esferas recirculantes é estudado para mensurar possíveis erros causados pela deformação térmica neste elemento da máquina, ou [18] que estuda o comportamento dinâmico do *spindle* através de uma análise de elementos finitos, pois o comportamento do *Spindle* pode ser determinante durante a operação de usinagem, principalmente para materiais duros. Ainda no mesmo assunto, [19] e [20] exploram a importância da análise dinâmica detalhada de máquinas de precisão e [21] mapeia as principais fontes de erros aleatórios e estuda o comportamento dos principais erros desse mapa ao longo do tempo para tentar estimar o tempo de vida útil da precisão da máquina.

Resumindo, no âmbito industrial já podemos ver a aplicação de fresadoras CNC de três ou mais eixos sendo utilizadas para confecção de modelos de embarcações extremamente complexos e com escala consideravelmente maior que a proposta neste projeto, mas, aparentemente, pouca é a documentação sobre o tema, não tendo sido encontradas referências acadêmicas sobre o tema. Aspectos um pouco menos específicos e mais amplos como a usinagem de poliuretano ou a usinagem de modelos de embarcações já possuem referências com valor para auxiliar esse projeto. Temas muito amplos como usinagem, fresadoras CNC, modelos de embarcações e poliuretanos possuem maior maturação e número de referências, que atacam problemas e detalhes específicos de cada um dos temas e até livros que já possuem o tema desenvolvido de forma abrangente, como por exemplo em [8] para Poliuretanos.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. REQUISITOS

Os requisitos do sistema foram definidos em [2], através de reuniões com o orientador do projeto e o departamento de Engenharia Naval e estão descritos a seguir.

4.1.1. VOLUME DE TRABALHO

Para determinar o volume de trabalho foram considerados os seguintes aspectos: tamanho dos modelos, custo da máquina e o sistema de movimentação usado. O tamanho dos modelos foram estimados em 2400x700x500 mm. Este tamanho implica na utilização de um sistema pinhão cremalheira e deixa o custo do projeto alto. Uma alternativa observada foi dividir a usinagem do modelo em três partes e realizar uma junção com uma cola especial, utilizada em empresas, como por exemplo, a Intermarine. Essa solução alternativa possui custo mais baixo, que foi determinante para escolha da solução. Assim, o volume de trabalho da máquina foi definido como 900x700x500 mm³.

4.1.2. VELOCIDADE DE AVANÇO

Em reunião, foi decidido que uma velocidade adequada para funcionamento da máquina seria de 500 mm/s, mas durante o dimensionamento dos motores, foi percebido que essa velocidade exigiria uma potência elevada dos motores e teria um custo alto. Portanto, a velocidade final de avanço ficou definida como 250 mm/s, que satisfaz a exigência de um usinagem rápida dos modelos com um custo razoavelmente menor. Além disso, esse valor de velocidade condiz com a capacidade de um motor de 3000 RPM e fuso de passo 5 mm, que possuem custos acessíveis para o projeto.

4.1.3. MÁXIMA ACELERAÇÃO

A máxima aceleração foi definida como 5 m/s², pois este valor não exige mais torque do que os motores escolhidos possam fornecer e atendem a performance desejada na máquina.

4.2. RESUMO DO PROJETO MECÂNICO

O trabalho feito em [2] constitui a base do presente projeto e realizou o projeto mecânico completo, por isso um resumo do que foi feito pelos alunos será apresentado a seguir.

4.2.1. SOLUÇÃO PROPOSTA

Em [22] são propostas algumas configurações básicas de máquinas ferramentas. As mais viáveis foram selecionadas e estão esquematizadas abaixo.

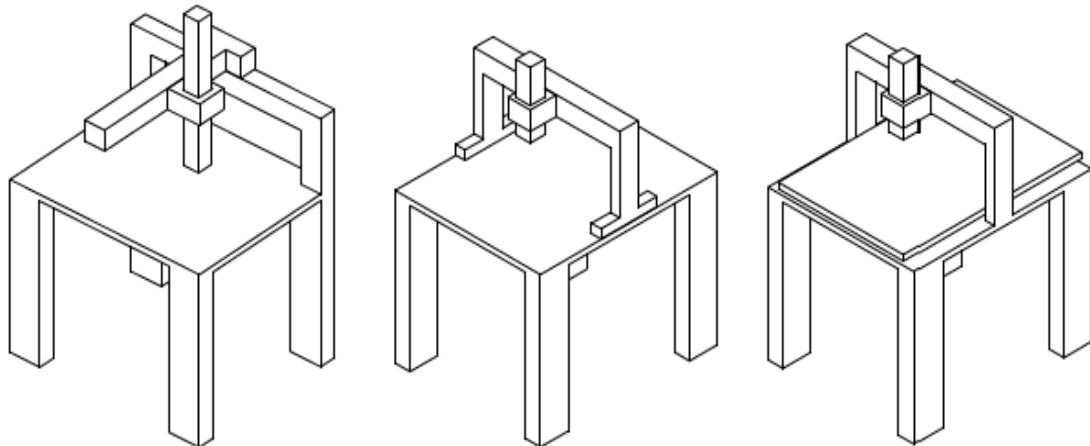


Figura 4 – Opções avaliadas para o desenvolvimento da máquina [2]

Como pontos fortes de cada máquina, podemos citar, respectivamente, pouca massa móvel e boa acessibilidade da peça e ferramenta (primeira opção), grande movimentação no eixo x (segunda opção) e pouca massa móvel no eixo x e z (terceira opção). Como pontos fracos podemos citar, baixa frequência natural e erros de Abbe (primeira opção), largura da peça limitada e dificuldade de acionamento do pórtico (segunda opção) e maior massa móvel no eixo y e limitação de largura da peça (terceira opção). O primeiro modelo foi escolhido por apresentar maior acessibilidade de peça e maior facilidade de montagem. [2]

Com base no modelo de solução escolhida e nas dimensões do requisito de volume do trabalho, o seguinte modelo final foi desenhando.

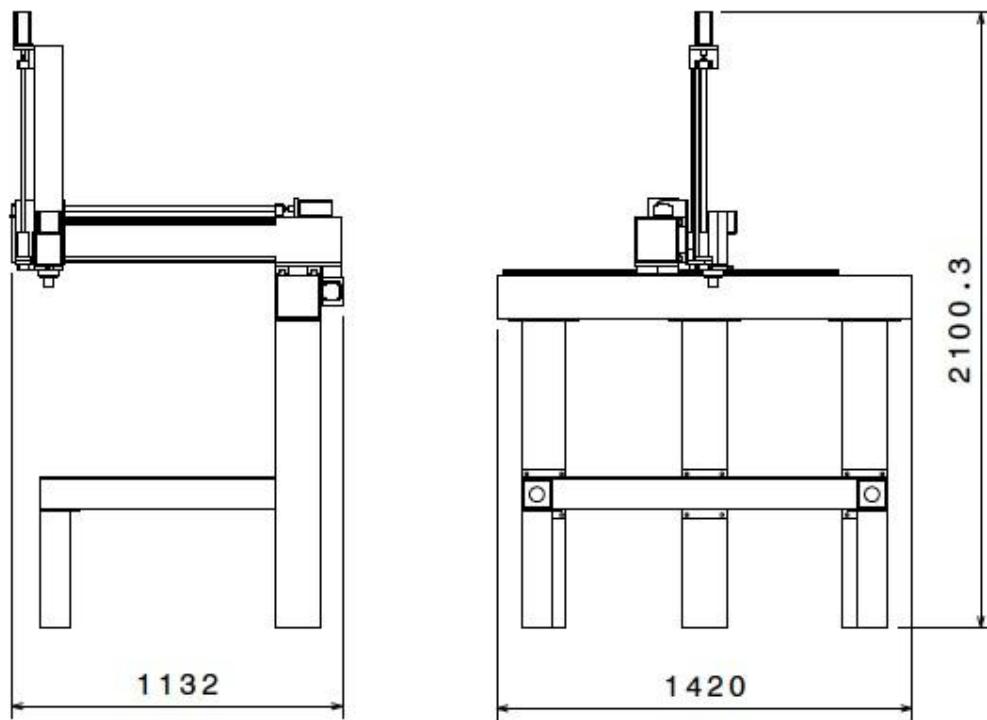


Figura 5 – Desenhos em perspectiva do modelo final [2]

4.2.2. DIMENSIONAMENTO

Foram dimensionados fusos, mancais, motores, *spindle* e mesa. Cada dimensionamento será descrito a seguir.

4.2.2.1. FUSOS

O dimensionamento dos fusos foi realizado utilizando a referência [23]. Existe um exemplo no documento ensinando como dimensionar os fusos. Seguindo o exemplo, calculou-se a força de arrasto utilizando a fórmula:

$$Fa = m \cdot g \cdot \mu \quad (1)$$

Sendo $g=10 \text{ m/s}^2$, o m é a massa associada a cada eixo e o coeficiente foi estimado como 0,1 para todos os fusos. Assim, estimando a massa do *spindle* em 6,8kg, temos:

$$Fa_z = m_z \cdot g \cdot \mu = 6,8 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 0,1 = 6,8 \text{ N}$$

A massa associada ao eixo y é a massa do *spindle* mais a massa do braço z. A massa do braço z pode ser calculada através da densidade e volume do braço.

$$m_{bz} = \rho \cdot V_{by} \quad (2)$$

$$m_y = m_z + m_{bz} \quad (3)$$

$$Fa_y = m_y \cdot g \cdot \mu$$

$$Fa_y = 8,5 \text{ N}$$

Utilizando um desenvolvimento semelhante para o eixo x, sendo a massa associada ao eixo x a soma da massa do braço y, com a massa associada ao eixo y (calculada acima), temos:

$$m_{by} = \rho \cdot V_{by} \quad (4)$$

$$m_x = m_y + m_{bx} \quad (5)$$

$$Fa_x = m_x \cdot g \cdot \mu$$

$$Fa_x = 10,7 \text{ N}$$

O próximo passo é a determinação do passo do fuso, que pode ser obtido pela relação da velocidade máxima do sistema pela sua rotação.

$$\text{Passo} = V_{\max} / \omega = 5 \text{ mm} \quad (6)$$

A carga dinâmica, pode ser calculada com a seguinte equação:

$$Ca = \sqrt[3]{60 \cdot N \cdot Lh \cdot Fa \cdot Fw \cdot 0,01} \quad (7)$$

Lh foi determinado como 10000 horas por ser uma máquina de baixo uso e Fw é 1,3, definido pela tabela 7.1 do manual, reproduzido abaixo.

Vibração e Impacto	Velocidade	Fw
Leve	$V < 15 \text{ (m/min)}$	$1,0 \sim 1,2$
Média	$15 < V < 60 \text{ (m/min)}$	$1,2 \sim 1,5$
Alta	$V > 60 \text{ (m/min)}$	$1,5 \sim 3,0$

Tabela 7.1

Tabela 2 – Tabela de fator de operação [23]

Assim, temos:

$$Ca = \sqrt[3]{60 \cdot 3000 \cdot 10000} \cdot Fa \cdot 1,3 \cdot 0,01 = 15,81 \cdot Fa \quad (6)$$

Substituindo o Fa de cada eixo, temos:

$$Ca_x = 16,99 \text{ kgf}$$

$$Ca_y = 13,45 \text{ kgf}$$

$$Ca_z = 10,75 \text{ kgf}$$

O critério está superdimensionado, pois foi verificado que para os fusos selecionados abaixo, obtemos uma carga dinâmica muito maior que a estimada:

$$Ca_x = 830 \text{ N (FS = 75, para fusos de 20 mm de diâmetro)}$$

$$Ca_y = 570 \text{ N (FS = 76, para fusos de 16 mm de diâmetro)}$$

$$Ca_z = 570 \text{ N (FS = 120, para fusos de 16 mm de diâmetro)}$$

A verificação do diâmetro do fuso se dá por:

$$D = (N \cdot L^2)/f \cdot 10^{-7} \quad (7)$$

Ambas as pontas dos fusos estarão fixadas, $f = 21,9$ de acordo com a tabela abaixo.

$$Df_x = 15,97 \text{ mm } (FS = 1,25)$$

$$Df_y = 9,87 \text{ mm } (FS = 1,62)$$

$$Df_z = 6,14 \text{ mm } (FS = 2,76)$$

apoiado - apoiado	$f = 9,7$
fixo - apoiado	$f = 15,1$
fixo - fixo	$f = 21,9$
fixo - livre	$f = 3,4$

Tabela 3 - Tabela com coeficiente de tipo de montagem [23]

Rotação fixa pode ser calculada com a fórmula a seguir:

$$N_{crit} = f \cdot (dr/L^2 \cdot 10^7) \cdot 0,8 \quad (8)$$

Os valores de dr podem ser obtidos nas tabelas do manual do fabricante e L é o tamanho do fuso entre mancais. Com estes valores, temos:

$$N_{critx} = 2606,15 \text{ rpm}$$

$$N_{crity} = 2941,14 \text{ rpm}$$

$$N_{critz} = 5070,74 \text{ rpm}$$

Na prática, as rotações não vão atingir seu valor máximo, então não teremos problemas com os valores de rotação crítica de x e y menores que 3000 rpm. Ainda mais levando em conta que a rotação crítica já é calculada utilizando um fator de diminuição. A vida útil pode ser calculada com:

$$Lh = \left(\frac{Ca}{Fa \cdot Fw} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{(60 \cdot N)} \quad (9)$$

A vida útil é um fator relativo a máquina, e não de cada fuso, pois os fatores que variam por eixo (Fa e Ca), podem ser relacionados e a fórmula simplificada.

$$Lh = 9 \cdot 10^9 \text{ horas}$$

Fator dimensionado também com boa segurança.

4.2.2.2. MANCAIS DE ROLAMENTOS

O dimensionamento dos mancais não foi necessário, pois os fabricantes consultados possuem mancais de apoio e acionamento próprios para cada tipo de fuso,

que variam pouco e apenas com o uso final da máquina. Em conversas com o fabricante, podemos definir qual é o melhor mancal a ser utilizado na máquina.

Os fusos deverão ser usinados de acordo com a necessidade de encaixe com os mancais. O mancal de acionamento é mais robusto que o mancal de apoio e a necessidade de usinagem do lado do fuso para acionamento é mais crítica, pois o fuso deve passar por toda a extensão do mancal, enquanto isso não é necessário para o mancal de apoio.

4.2.2.3. MOTORES

O seguinte esquema simplificado foi utilizado para dimensionamento dos motores dos eixos horizontais.

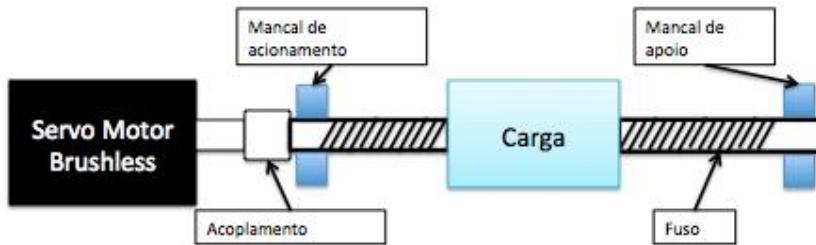


Figura 6 – Modelo simplificado de acionamento dos motores para cada eixo [2]

$$T_{máx} = \frac{[J_{fuso} + J_{rotor} + M_{mov} \cdot (p/2\pi)^2] \cdot \alpha}{\eta} \quad (10)$$

Sendo J a inércia associada a um determinado elemento, M_{mov} é a massa equivalente movida, p é o passo, α é a aceleração angular máxima do sistema, que pode ser calculada utilizando a aceleração máxima do sistema e as dimensões do fuso e η é o rendimento do sistema (estimado em 95%).

Dimensionamento do eixo X

Através do catálogo de fusos [24], podemos encontrar o valor do momento de inércia do fuso de 20 mm de diâmetro em função do seu comprimento, que é $3,01 \cdot 10^{-3} \cdot kg \cdot cm^2/mm$. O eixo possuirá 1150mm de comprimento, logo sua inércia é $3,46 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot m^2$. A inércia do rotor deve ser adquirida pelo manual do fabricante do motor. Foram observados os catálogos de motores de dois fabricantes, Mitsubishi [25] e Hiwin Megafabs [26], e diferentes modelos entre 100W, 200W, 400W e 750W.

Verificou-se que apenas os modelos de 750W possuíam capacidade de transmitir o torque necessário para a máquina, porém seu custo é relativamente alto. Assim, definiu-se que o motor de 400W seria utilizada e a velocidade de trabalho de 500mm/s seria reduzida para 250mm/s. A potência foi calcula através da fórmula $P = T \cdot \omega$.

Dimensionamento do eixo Y

O motor Y precisa de muito menos potência, pois tem menor massa associada ao movimento do eixo, menor curso (880mm) e menor diâmetro (15mm), diminuindo sua inércia. Utilizando o mesmo processo do eixo anterior, temos a inércia do fuso no valor de $0,343 \cdot 10^{-4} \cdot kg \cdot m^2$, torque de 0,28 Nm e potência de 87W. Entretanto, os alunos optaram por utilizar um motor de 200W, para ter uma folga de potência.

Dimensionamento do eixo Z

Foram realizados cálculos análogos aos cálculos realizados nos itens acima para o eixo z. A diferença foi a inclusão da ação da força peso no dimensionamento. Mesmo com a ação dela, os resultados obtidos foram semelhantes ao eixo y (toque de 0,26 Nm e potência de 80,5W), pois a massa associada ao movimento do eixo z é muito menor que os outros eixos. Este motor tem uma característica diferente dos outros, pois a presença de um freio magnético é obrigatória, já que o eixo não pode movimentar-se sem o acionamento do motor.

Spindle

O *spindle* foi escolhido através de consulta ao manual da fabricante FIMEC (marca já conhecida pelos alunos Eduardo e Otávio), e a rotação foi definida consultando funcionários e professores do corpo docente e realizando um teste de usinagem na fresadora CNC do departamento. O *spindle* escolhido tem 18000 RPM e é ligado com 220V.

Mesa

A mesa foi dimensionada em 1245x800x6 mm. Os materiais avaliados foram madeira, alumínio e aço. A opção da madeira tem como principal vantagem a segurança da ferramenta, pois o contato da ferramenta com madeira não danificaria

a ferramenta. A opção de alumínio possuía menor massa. Entretanto, a opção do aço se mostrou mais prática, barata e viável. A massa total da mesa foi estimada em 45,4 kg (densidade 7600 kg/m²). Foi proposto um sistema em forma de cruz que foi colocado na parte inferior da mesa para evitar que a mesa sofria deformação durante a operação de usinagem.

Cálculo Estrutural

O cálculo estrutural foi realizado para verificar as frequências dos modos de vibrar da estrutura. É importante garantir que as frequências naturais estejam acima de 30Hz para materiais moles como madeira e poliuretano [27]. Este requisito é muito maior para usinagem de aços, como vemos por exemplo em [4].

O primeiro ensaio do modelo, revelou que a máquina possuía frequências de vibração baixas, indicando que sua utilização não seria adequada ao fim proposto. Boa parte dessa vibração era oriunda da flexão dos eixos Y e Z e flexão do eixo X.

Ensaio 1	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Freq (Hz)	8,194	14,682	36,208	49,377	77,715	337,22

Tabela 4 – Resultados dos modos de vibrar para o primeiro ensaio

Por esse motivo, algumas mudanças tiveram que ser estudadas. Os alunos estudaram os modelos simplificados de flexão e torção utilizando as equações e os modelos simplificados abaixo para decidir quais alterações fariam mais efeito no aumento das frequências naturais.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

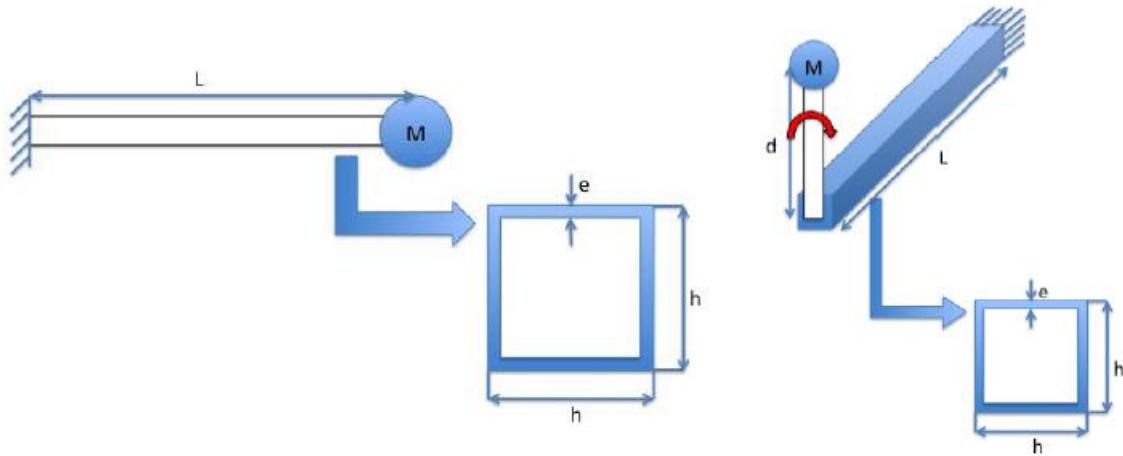


Figura 7 – Modelos simplificados de flexão e torção respectivamente

Flexão:

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (11)$$

$$I = \frac{h^4}{12} - \frac{(h-2e)^4}{12} \quad (12)$$

Torção:

$$k = \frac{GJ}{Ld^2} \quad (13)$$

$$J = 2 \cdot I \quad (14)$$

O cálculo com as fórmulas acima resultou numa frequência de 22 Hz para a seção de 100x100 mm e 40 Hz para a seção de 150x150 mm para o caso de flexão. O cálculo de torção apresentou valores maiores que o caso de flexão, não sendo relevantes para essa análise.

Assim, decidiu-se aumentar o tamanho da seção de perfil tubular quadrado de 100 mm para 150 mm, para diminuir a flexão envolvida nos eixos de movimentação e também da própria estrutura. Além disso, a adição de uma terceira coluna central para reforço do eixo X foi adicionada para que a flexão das colunas seja menor. Com as modificações mencionadas acima, o ensaio da estrutura com o software Abaqus obteve os seguintes resultados, que são satisfatórios.

Ensaio 2	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Freq(Hz)	29,78	32,77	57,89	72,97	115,95	128,11

Tabela 5 – Resultados dos modos de vibrar para o segundo ensaio (seção de 150 mm)

Desenho de Conjunto Final

Após a obtenção do modelo final teórico, os alunos concluíram o desenho de conjunto final e os desenhos de fabricação, com algumas alterações. A principal alteração foi introduzir peças de fixação na base da máquina, em lugares em que originalmente a junção seria feita por solda, para aumentar a flexibilidade da máquina, que poderá ser montada e desmontada para operação em diferentes locais e também por facilidade de fabricação. A seguir temos o desenho de conjunto e o modelo final.

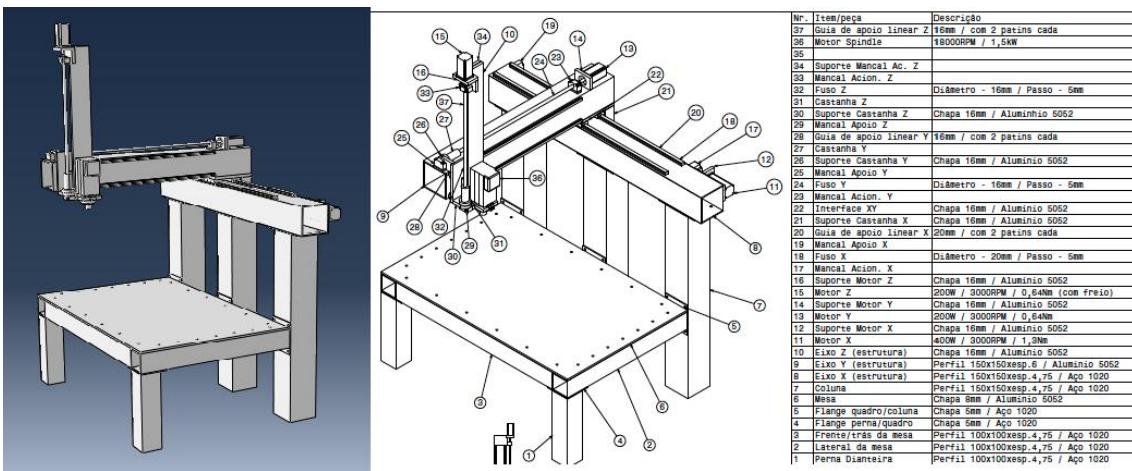


Figura 8 – Modelo final do CATIA e desenho de conjunto final

4.3. REVISÃO DO PROJETO MECÂNICO

4.3.1. REVISÃO DO DIMENSIONAMENTO

Após o entendimento e resumo do projeto mecânico, uma revisão crítica do dimensionamento mecânico foi proposta.

O primeiro erro identificado está no cálculo da força de arrasto do eixo Z. Além da componente de atrito, o cálculo da força em eixos suspensos deve incluir a componente da força peso correspondente. Assim para calcular a força do eixo Z devemos aplicar a seguinte.

$$Fa_z = m \cdot g \cdot \mu + m \cdot g \quad (10)$$

$$Fa_z = m_z \cdot g \cdot \mu + m_z \cdot g = 6,8 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot (1,1) = 74,8 \text{ N}$$

E utilizando a fórmula (6), chegamos em:

$$Ca = 15,81 \cdot Fa = 119 \text{ kgf}$$

O que nos dá uma carga dinâmica muito maior que a calculada anteriormente, e um fator de segurança muito menor (menor que 5). Além disso, por algum erro de

distração, os fatores de segurança dos outros eixos está incorreto. Os valores corretos são 49 e 42, respectivamente (obtido pela simples divisão entre os valores calculados e de tabela apresentados pelos próprios alunos Eduardo e Otávio).

Em x, para um fuso de 20 mm e passo 5 mm, temos um diâmetro interno (dr) de 17,42 mm de acordo com as tabelas do fabricante. Em y e z, para fusos de 16 mm de diâmetro e passo de 5mm, temos um diâmetro interno de 13,42 mm. Provavelmente por distrações, os alunos Eduardo e Otávio utilizaram valores diferentes de diâmetro interno. Com estes valores, temos:

$$N_{crit} = f \cdot (dr/L^2 \cdot 10^7) \cdot 0,8 \quad (8)$$

$$N_{critx} = 2765,06 \text{ rpm}$$

$$N_{cirty} = 3031,63 \text{ rpm}$$

$$N_{critz} = 5226,76 \text{ rpm}$$

Minimizando ainda mais o possível problema de se atingir a rotação crítica do sistema. Logo, nenhum dos erros encontrados compromete o projeto mecânico.

4.3.2. REVISÃO DO PROJETO MECÂNICO

Alguns detalhes de [2] precisaram ser revistos e algumas peças precisaram ser desenhadas novamente. O *spindle* adquirido em pregão, possui dimensões diferentes das previstas, assim como os motores, implicando em ajustes no desenho de seus respectivos apoios. Além disso, as medidas de usinagem especificadas para os fusos, precisaram ser ajustadas para se adequar aos mancais disponíveis pelo fornecedor. O tamanho usinado do fuso para o mancal de acionamento inicialmente previsto era menor que o a largura do mancal disponível. Ainda, por indicação do fornecedor, o lado do fuso usinado para o mancal de apoio, foi alterado para incluir um anel trava, que dará maior confiabilidade e segurança ao projeto. Essas alterações foram incluídas nos desenhos de fabricação e podem ser verificados no fim da monografia.

4.4. SOFTWARE LINUX CNC

O software Linux CNC foi o software de controle escolhido para realizar acionamento dos drivers dos motores. Sua escolha foi motivada principalmente por ser um software gratuito e com diversas funcionalidades que serão melhor exploradas nas seções seguintes.

4.4.1. INTRODUÇÃO

O LinuxCNC é um software gratuito, de código aberto, capaz de controlar máquinas com até nove eixos de movimentação. Suas qualificações incluem a existência de diversos modelos de interface gráfica com o usuário, interpretador de código G, capacidade de operar drivers de motores e sensores, utilização de software com diagramas de contatos para controle de eventos discretos, controle em malha fechada de servo motores e controle em malha aberta de motores de passo e suporte para máquinas não cartesianas (ex. robô delta) através de módulos cinemáticos personalizados. Além das qualificações listadas acima, o LinuxCNC possui compensação do raio de corte e comprimento da ferramenta, sincronização de eixos e controle da velocidade de operação dos motores. [28]

O software é bastante utilizado e sua rede de usuários é altamente colaborativa, contribuindo com a melhoria constante dos guias de utilização e geração de conteúdo para blogs e fóruns da internet. [29]

4.4.2. REQUISITOS MÍNIMOS

Os seguintes requisitos mínimos são indicados para uma boa operação do LinuxCNC.

- Processador de 700 MHz x86 (o processador ideal seria 1,2 GHz x86)
- 348 MB de RAM (1 GB ideal)
- 8 GB de disco rígido
- Placa de vídeo com resolução de pelo menos 1024x768, *offboard* (a placa de vídeo não deve dividir o uso da memória com o CPU)¹

Apesar das recomendações dadas, o teste de latência é mais importante que o processador do computador utilizado. [30]

4.4.2.1. TESTE DE LATÊNCIA

Durante a execução de um programa no LinuxCNC, o processador deverá parar o que está fazendo para atender o pedido de enviar sinais e pulsos para os drivers dos motores. O teste de latência identifica exatamente qual o tempo necessário para o processador parar suas tarefas e atender esse pedido. Quanto menor for o tempo necessário para essa operação, maior será a eficiência do computador no controle dos drivers dos motores e menor será a probabilidade de “perder” pulsos. [28]

A latência é muito mais importante que a velocidade do processador, pois mesmo com um bom processador, podemos ter uma baixa latência por uma série de fatores como desempenho conjunto de placa-mãe, placa de vídeo, atrasos de porta USB ou paralela, entre outros. [30]

Um computador é um candidato ideal para o uso se sua latência está abaixo de 15 micro segundos. Mesmo assim, latências mais altas podem produzir bons resultados se o computador for utilizado apenas para o uso do LinuxCNC e também respeitar outras limitações de menor importância. [30]

4.4.3. PORTA PARALELA

Para utilizar o LinuxCNC, devemos utilizar a porta paralela do computador como interface para enviar sinais do computador para os servodrivers, e também para receber sinais dos *encoders* e chaves fim-de-curso.

A porta paralela do computador possui 25 pinos e permite o envio e recepção de mais de um sinal de forma simultânea. Sua utilização era ampla antes do advento das portas USB, principalmente para conexão de impressoras, webcams e joysticks. Após o surgimento da USB, praticamente todas as aplicações da porta paralela foram implementadas utilizando portas USB (ou Ethernet), tendo as impressoras sobrevivendo com portas paralelas por algum tempo, mas não sendo mais utilizada nos dias de hoje. A utilização de portas paralelas hoje é identificada em aplicações muito específicas, como o controle de máquinas CNC. Por seu uso ser muito restrito nos dias de hoje, a maioria dos computadores fabricados atualmente não possuem uma porta paralela. [31]

A principal vantagem da porta paralela quando comparada com uma porta serial é a maior velocidade de transmissão de dados, fruto da capacidade de enviar mais de um dado simultaneamente. Entretanto, para a maioria das aplicações usuais, a velocidade de transmissão serial nos computadores e periféricos associados e suas capacidades de processamento, tornam a necessidade de transmissão paralela insignificante. Dessa maneira, torna-se mais vantajoso utilizar a transmissão serial, que permite a transmissão por maiores distâncias, com menor sensibilidade a ruídos. [32]

Para o presente projeto, o desenvolvimento será iniciado utilizando a porta paralela por oferecer implementação mais fácil, mas a utilização da porta USB será estudada (ou outra interface mais utilizada), visando permitir a utilização da máquina

com computadores atuais.

A porta paralela possui alguns pinos selecionados para a recepção de sinais, outros com a função específica de envio de sinais do computador para o circuito de controle e alguns pinos que servem para recepção e envio de sinais, além de oito pinos que atuam como terra (GND). A figura a seguir exemplifica o esquema padrão de uma porta paralela de 25 pinos (conector DB25).

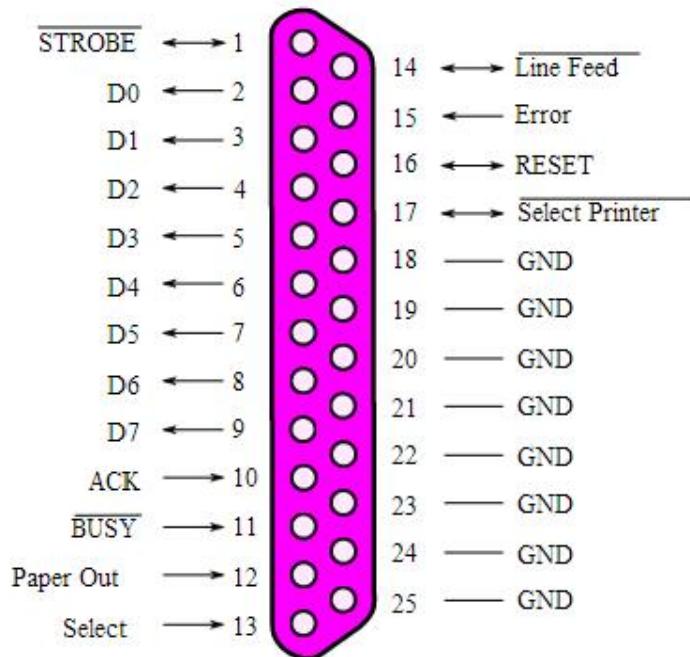


Figura 9 – Pinagem porta paralela (DB25) [31]

A porta paralela do computador é relativamente sensível, tendo uma capacidade de fornecer corrente não maior que 0,26 mA e capacidade de dreno menor que 24 mA [32]. Por esse motivo, é essencial o cuidado com o uso da porta paralela. Para o uso correto da porta, teremos drivers e circuitos de interfaceamento entre os motores e a porta paralela, que serão melhor explicados mais adiante.

4.4.3.1. CONFIGURAÇÃO DA PORTA PARALELA NO LINUX CNC

O Linux CNC possui um assistente de configuração dos pinos da porta paralela, que é aberto após a janela de configuração básica da máquina (nome da máquina, unidade padrão da máquina, endereço da porta paralela, entre outros). A configuração deve ser feita de acordo com os movimentos realizados pela máquina, bem como pelos sensores da máquina (chaves fim-de-curso). No caso da máquina

em questão, configuraremos três eixos. Cada eixo possuirá um sinal de direção e sinal pulsante, que juntos indicarão a velocidade e a direção de cada eixo. A configuração está exemplificada a seguir. [30]

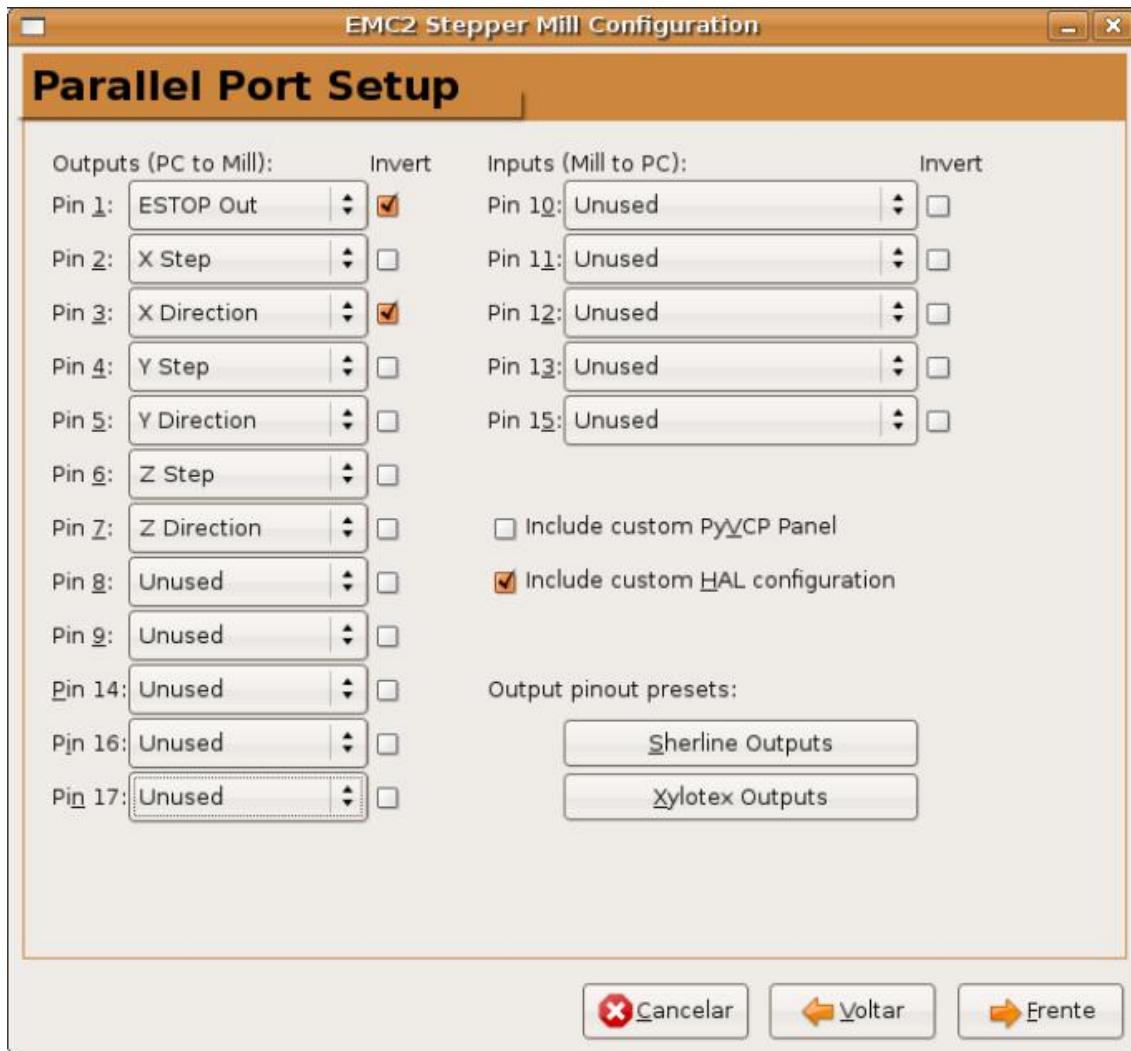


Figura 10 – Configuração porta paralela

Na máquina, a configuração foi feita como na figura acima, com as seguintes modificações:

- Pino 8 – Habilitação do *Spindle*
- Pino 9 – Pulso Spindle
- Pino 10 – Entrada do sinal de alarme
- Pino 11 – Limite negativo X
- Pino 12 – Limite negativo Y
- Pino 13 – Limite negativo Z

4.4.4. SIMULAÇÃO DE USINAGEM NO LINUX CNC

Para validar o entendimento do software LinuxCNC foi realizado uma simulação de usinagem através do modo simulador do LinuxCNC.

4.4.5. CONFIGURAÇÃO DO COMPUTADOR DISPONÍVEL

O computador disponibilizado pelo departamento de Engenharia Naval através do professor Bernardo, se encontra na sala CGEN, sala disponível para realização de alguns projetos de *iniciação científica* e trabalhos de conclusão de curso do departamento de Engenharia Naval, e possui a seguinte configuração:

- Processador Intel Core 2 Duo E7500 2,93 GHz
- Placa *offboard* Nvidia GeForce 9500 GT
- Ubuntu 11.04
- LinuxCNC 2.5.4
- Memória RAM de 4GB
- 376 GB de RAM

Seu teste de latência (explicado na seção 4.1.2.1.) produziu um resultado de 20000ns (*max jitter*) depois de 2 horas fazendo as tarefas simples (utilizando editores de texto). Ao sobrecarregar o uso do computador com outras tarefas (downloads, visualização de vídeos e outros itens, este valor saltou para quase 100000ns, que é ainda aceitável, mas ao utilizarmos a porta USB do computador para inicializar arquivos armazenados em um celular ou abrir uma página da internet, o valor saltou para 500000ns, o que não é mais aceitável. Assim, o teste indica que o computador é apropriado para o uso do LinuxCNC, desde que nenhuma outra aplicação seja utilizada durante a usinagem das peças. Como o recomendável é que não se utilize o computador no momento da usinagem, o computador deve conseguir controlar a máquina sem perder pulsos. Entretanto, como o valor encontrado foi muito alto ao abrir uma página da internet, por segurança uma investigação mais profunda do problema foi feita.

Ao iniciar o Ubuntu neste computador, um problema foi sinalizado com a mensagem “*Ubuntu is running low graphics*”, mas mesmo assim o sistema consegue ser iniciado com a tela apresentando problemas de resolução e dimensionamento. Ao iniciar o LinuxCNC, uma mensagem de erro foi apresentada e o LinuxCNC não foi carregado. A resolução dos problemas encontrados demandou um esforço

significativo e quase mudou a opção de software feita, e por isso, foi documentada na seção seguinte.

É importante salientar que para realização da simulação no LinuxCNC, devemos ter instalado o módulo de simulação junto ao LinuxCNC. Alguns pacotes pré-compilados disponíveis no site LinuxCNC.org já possuem o modo de simulação. Estas informações e instruções para instalação do módulo de simulação estão presentes em [33] e [34]. O pacote presente no computador já possui o módulo presente. Isso foi verificado após a tentativa de instalação presente em [34].

4.4.6. RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DO LINUXCNC

Para resolver os problemas encontrados, primeiramente foi feito um contato com os alunos Eduardo e Otávio sobre os problemas encontrados. Os problemas realmente já aconteciam quando eles utilizaram o computador e os alunos não conseguiram resolvê-los, mas felizmente possuíam um outro computador para a realização dos testes no protótipo utilizado.

Após uma primeira tentativa frustrada de solução de problemas, utilizar outro computador ou um software semelhante ao LinuxCNC que funcionasse com Windows, como o Mach3, foi avaliada. O custo de obtenção do software e adaptação de um novo computador [35] motivaram um maior empenho em solucionar os problemas do computador presente com LinuxCNC. Além disso, o professor Bernardo, deixou claro o desejo de utilizar aquele mesmo computador e o contato do técnico do departamento que cuida dos computadores do prédio foi passado, para ajudar caso a solução dos problemas não fosse atingida.

Na tentativa de solucionar o primeiro erro (“*Ubuntu is running low graphics*”), uma pesquisa contendo a frase foi feita e rapidamente identificamos que o problema pode acontecer por uma série de fatores. Os principais fatores incluíam a não utilização de placa de vídeo adequadas, que foi descartado após a verificação de vários usuários que utilizavam a mesma placa de vídeo, pouco espaço em disco, não atualização do driver da placa de vídeo e problemas na instalação do desktop do Ubuntu. Os comandos abaixo foram utilizados no terminal do LinuxCNC para tentar resolver esses problemas. [36]

```
$ sudo apt-get install nvidia --current (instalação do driver atual)
```

\$ sudo apt-get install --reinstall ubuntu-desktop (reinstalação do desktop)
--

Tabela 6 – Lista de comandos utilizados na tentativa de solução de problemas [36]

A utilização dos comandos acima não resolveu o problema. Alguns usuários recomendavam a iniciação do Ubuntu no modo “*Recovery mode*” quando o menu “GNU GRUB” é aberto após a reinicialização do computador e o uso da opção *failsafe* x antes da utilização dos comandos acima, porém o erro persistiu mesmo com esse procedimento. [36]

Supondo que o erro apresentado apresentando na abertura do LinuxCNC estivesse relacionado com o primeiro erro, uma pesquisa com o segundo erro foi realizada. As principais fontes apresentavam as mesmas soluções para esse erro junto com o segundo erro e indicavam que os dois erros eram causados pelo mesmo problema, uma nova opção foi proposta em [37]. Através do arquivo .INI de configuração da máquina, podemos alterar o modo de exibição da IHM e selecionando outro modo de exibição, conseguimos rodar o LinuxCNC, mas não conseguimos visualizar a simulação e também não conseguimos executar algumas tarefas básicas como definir o “zero máquina”. Em [37], foi indicado que a falta do OpenGL pudesse estar relacionado ao problema. Através de [38], utilizou-se um comando para instalar uma extensão necessária, mas não houve resultados. Pesquisando mais sobre o OpenGL, encontramos em [39] um comando instalar a extensão GLX ao OpenGL novamente. Fazendo isso e reiniciando o computador, conseguimos resolver ambos os problemas.

\$ sudo apt-get install libgl1-mesa-glx

Tabela 7 – Comando utilizado para resolução dos problemas [39]

Entretanto, mesmo resolvendo os problemas de inicialização do LinuxCNC, o teste de latência continuava apontando resultados não ideais para sua utilização. Com o auxílio do técnico Rodolfo, tentamos utilizar alguns tipos de *kernel* customizados para aplicações *realtime*. Imediatamente tivemos uma melhora nos resultado, não tendo mais picos exageradamente altos como anteriormente (500 000 ns). A solução total veio quando utilizamos um *kernel* customizado do último release do LinuxCNC (2.6), limitando os picos anteriores a 25000 ns.

4.4.7. SIMULAÇÃO

Uma simulação foi realizada utilizando o código G que está em anexo. A

simulação foi realizada utilizando o software de gravação de tela chamado “recordMyDesktop” e o software “mencoder” para conversão do vídeo para formato “.avi” com os seguintes comandos.

```
$ sudo apt-get install gtk-recordmydesktop
$ sudo apt-get install mencoder
$ mencoder -idx teste.ogv -ovc lavc -oac mp3lame -o teste.avi
```

Tabela 8 – Comandos utilizados para instalar programas que possibilitam a gravação da tela [40]

O processo utilizado para realizar a simulação está descrito detalhadamente a seguir. O vídeo do processo básico de simulação pode ser visualizado em [41]

4.4.7.1. PREPARAÇÃO E CONFIGURAÇÃO

Tendo instalado corretamente o LinuxCNC e o simulador, devemos iniciar o LinuxCNC e escolher a configuração da máquina. Este processo deve ser feito utilizando o pncconf wizard para a maioria das usinagens reais para configurar com detalhes o controle da máquina. Neste exemplo foi escolhida uma configuração padrão de três eixos lineares (sheerline 3_axis) , pois não há nenhum dispositivo sendo efetivamente controlado. Fazendo isso, o LinuxCNC gera uma pasta com os arquivos gerados para determinada configuração de máquina e um atalho no desktop do Ubuntu para inicialização rápida do arquivo de controle da máquina.

Entre os arquivos presente nessa pasta, podemos destacar o arquivo “nome.ini”. Este arquivo com extensão “INI” é responsável pelas principais configurações da máquina, incluindo a seleção da interface gráfica utilizada pelo LinuxCNC através do campo [DISPLAY]. Fazendo o campo [DISPLAY] igual “axis”, temos uma determinada interface. Fazendo o campo [DISPLAY] igual “mini”, temos outra interface. Existem diversos tipos de interface já prontas no LinuxCNC. A interface “axis” é a melhor entre as interfaces padrões, por ser uma das poucas que realiza a simulação em tempo real e por disponibilizar a interface de uso mais intuitivo, como exemplo da figura abaixo. O arquivo “INI” permite a configuração de diversos outros parâmetros, como tamanho detalhes de trajetória, configuração de unidades padrão, interpretação de código G e outros. Um parâmetro muito importante é a área limite de usinagem, que é configurada automaticamente tanto no *stepconf*, *pncconf* ou em modos de configuração padrão do LinuxCNC e não pode ser alterada através de nenhuma interface, sendo um problema para usuários iniciantes que acabam

encontrando dificuldades para realizar suas tarefas. [42]

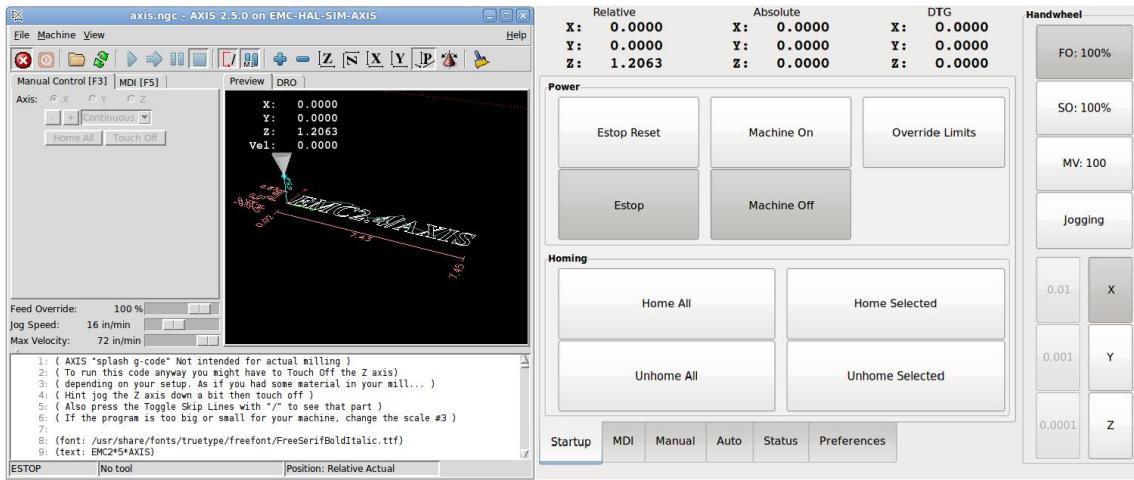


Figura 11 – Comparação entre duas interfaces padrão do LinuxCNC (AXIS [43] e TOUCHY [44])

Podemos observar que a interface *touchy* não possui uma janela para visualizar a usinagem, não permitindo também a visualização de uma simulação. Nesta interface o acompanhamento da simulação é feita pela posição da ferramenta que é mostrada em coordenadas na parte superior da interface.

A interface *touchy* não possui essa opção, mas é uma interface mais prática pelo tamanho e posição dos botões e eventualmente pode ser uma melhor opção em situações que não necessitem da visualização gerada pela interface *axis*.

4.4.7.2. DESCRIÇÃO INTERFACE “AXIS”

A figura abaixo possui uma típica seção do LinuxCNC iniciada com a interface “AXIS”.

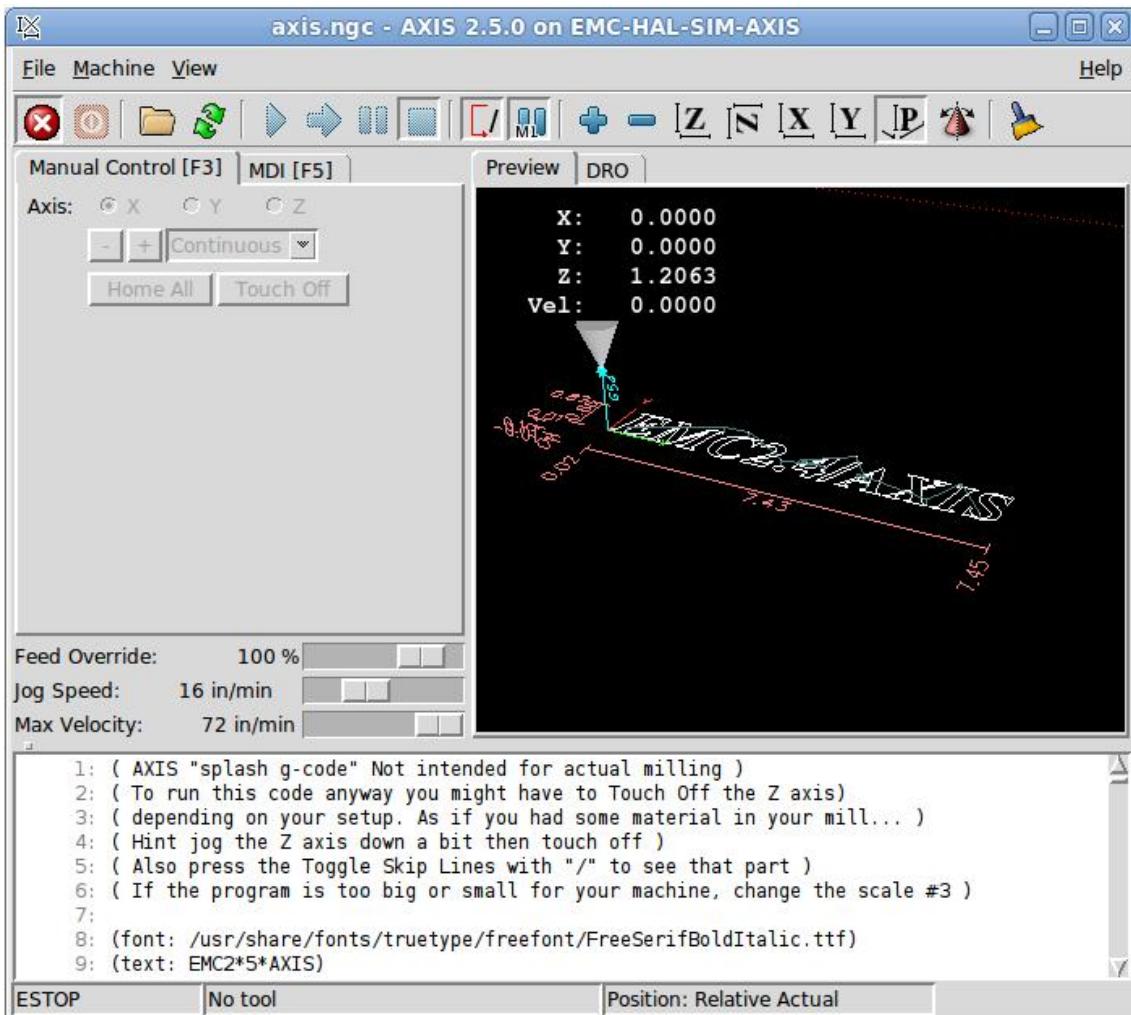


Figura 12 – Tela inicial do LinuxCNC com a interface AXIS

O botão pressionado no canto superior esquerdo da figura (“X”) é o botão de parada de emergência e fica pressionado no início de cada trabalho, devendo ser pressionado novamente para liberar a máquina para o trabalho. O botão ao lado liga a máquina e libera as outras opções que estão apagadas no momento. Abaixo desses botões temos a opção de selecionar cada eixo envolvido e em seguida utilizar os comandos de “*Jog*”, através dos botões + e -, a opção de zerar cada eixo, através do botão “*Home Axis*” e a opção de “*Touch Off*” que adiciona um offset para o eixo com a função de compensar qualquer desvio, alteração ou mesmo o raio de corte.

Além desses botões temos as opções de controlar as velocidades envolvidas na usinagem, desde que os respectivos drivers estejam ligados corretamente, através das barras encontradas abaixo dos botões descritos anteriormente. Temos as janelas de visualização, com a visualização do código G abaixo da caixa de

velocidades e a visualização da simulação na parte direita da janela. Os botões na parte superior direta alteram a vista da janela de simulação, podendo olhar o plano XY, XZ ou YZ e as perspectivas. A visualização também pode ser alterada com o mouse segurando o botão do meio do mouse e o movendo. Os botões da parte central (em azul) são utilizados para a execução do programa em código G. O código G deve ser carregado através de “File”->“Open”.

Durante a visualização, as linhas são mostradas com diversas cores para ilustrar o que acontece na realidade. Movimentos gerados com o comando G0 são representados na cor ciano e movimentos gerados pelo comando G1 são mostrados em branco. Medidas e limites de máquina são mostrados em vermelho, “jogs” são indicados em amarelo, verde para movimentos rápidos e a cor magenta é utilizada para interpolações circulares. [43]

4.4.7.3. INICIALIZAÇÃO

Tendo selecionado a interface “axis” e escolhendo um tamanho adequado para a área de trabalho da máquina através do arquivo .INI, podemos iniciar a simulação. A simulação, como um processo de usinagem real, segue os seguintes passos. Primeiramente, devemos destravar a parada de emergência (F1) e “ligar” a máquina (F2). Em seguida, devemos definir o “zero” de cada eixo, através do botão “home axis”, carregar o programa em código G, verificar o programa em código G através da imagem prévia gerada na interface, configurar o offset adequado de cada eixo e rodar o programa através do botão “run”. [43]

4.4.8. OBTENÇÃO DO CÓDIGO G

A primeira simulação foi feita utilizando um código relativamente simples, pois continha apenas letras e formas básicas, além de possuir um número de linhas relativamente reduzido. O código da simulação é um dos códigos de exemplo que podem ser encontrados no site do LinuxCNC, mas poderia ser feito manualmente ou com algum gerador de código G simples presente na internet, como o gerador de código G disponível pela comunidade do LinuxCNC [45].

Entretanto, para usinagens mais complexas, que possuem formato não convencional e que vão remover uma quantidade relativa de material do bloco original, a geração de código G não é viável por métodos simples. Nesse caso, a utilização de softwares específicos de CAD/CAM, que possuem a opção de gerar o

código G automaticamente, aparecem como alternativa para o problema.

O software CATIA foi escolhido entre os softwares disponíveis por ter sido indicado por professores, colegas e pela ajuda prestada pela 3DS Academy em fornecer uma licença gratuita após uma breve negociação.

O processo de geração de código G utilizando o CATIA para uma fresadora de três eixos está exemplificada no vídeo presente em [46] e explicado com mais detalhes a seguir.

4.4.8.1. GERAÇÃO DO CÓDIGO G PARA O CASCO

A geração do código G do CATIA começa com o desenho do casco, que deve ser preferencialmente desenhado no próprio CATIA, mas qualquer formato importável para o CATIA (exemplo: arquivos “.igs”) pode ser usado, possibilitando o uso de outros CAD’s. Nesse caso, um cuidado importante que se deve ter em mente é que durante a geração do arquivo compatível com CATIA, devemos selecionar opções de exportação que façam do modelo desenhado um sólido, isto é, alguma superfície com preenchimento externo. De outra maneira, poderíamos incorrer no problema de importar uma superfície, como um “*geometrical set*” que não possui as mesmas características de um sólido do CATIA e não pode ser usinado, mas através de algumas operações podemos, na maioria dos casos, torná-lo “usinável”.

Para isso, devemos entender que um *geometrical set* não possui espessura e nem suavização entre suas partes. Portanto, o primeiro passo é inserir uma determinada espessura em cada parte do desenho. Em seguida, devemos orientar cada superfície de maneira adequada e uní-las formando um único sólido. Todo esse processo pode ser conferido em [47].

As etapas posteriores ao desenho da peça, que estão exemplificados no vídeo [46], consistem em, primeiramente, desenhar a peça bruta de onde o material será usinado, posicionar a peça final dentro da peça bruta da maneira desejada e referenciá-las entre si. No caso em que conseguimos importar um sólido para o CATIA utilizando, por exemplo, o *Rhinoceros* (programa utilizado pelos alunos do Poli Náutico para criação do modelo), devemos exportar seu arquivo para um formato adequado (“.igs”, selecionar a opção “*CATIA solids* durante a exportação”). Em seguida, criamos o bloco bruto da peça. Esse bloco bruto deve ter, preferencialmente, o tamanho do bloco bruto disponível na realidade, pois assim teremos uma estimativa melhor do tempo necessário para usinagem no próprio

CATIA. Para criar o bloco bruto, entramos no modo de rascunho (“*Sketcher*”) e desenhamos um retângulo com as medidas do bloco disponível. Depois, saímos do modo de rascunho e extrudamos o retângulo, utilizando o comando “*Pad*”, criando assim o bloco bruto (denominado “*STOCK*”, nas operações do CATIA). Ainda no modo de desenho do CATIA, devemos indicar o ponto inicial da usinagem e um plano superior de segurança, para ser utilizado entre as operações de usinagem e garantir que o *spindle* não faça movimentos indesejados entre uma operação e outra. Para isso, devemos utilizar os comandos “*Point*” e “*Plane*”. As figuras abaixo exemplificam o processo de importação, criação do bloco bruto, do ponto de referência e o plano de segurança.

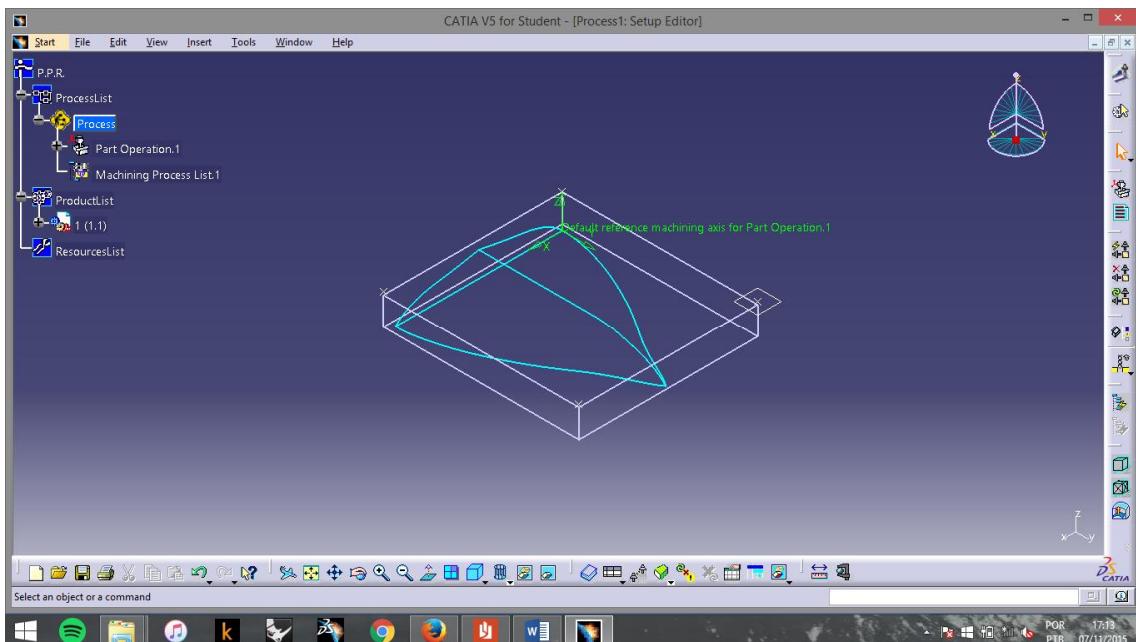


Figura 13 – Casco com bloco bruto, ponto de referência e plano de segurança criados

Feito isso, devemos iniciar o módulo de usinagem, denominado “*Machining*” e encontrado no menu “*Start*” do CATIA. Para o tipo de superfície que usinaremos ao fazer modelos de barco, iremos utilizar a operações de usinagem “*Surface machining*”. Após iniciar o “*Surface machining*”, devemos dar dois cliques na opção “*Part Operation.1*” para abrir a janela de configuração de máquina, mostrada abaixo.



Figura 14 – Tela inicial de configuração de máquina

Em (1), configuramos a máquina como a “3-axis machine”, na aba “Numerical Control” Para a maioria dos cascos, utilizaremos 3 operações de usinagem para obtenção do casco final. Em (2), devemos selecionar o ponto de referência criado. Em (3), (4) e (5) selecionamos o casco, o bloco e o plano criado anteriormente. Em (1), configuramos a máquina como a “3-axis machine”, na aba “Numerical Control” configuramos o pós-processador, que permitirá a geração de código G no futuro.

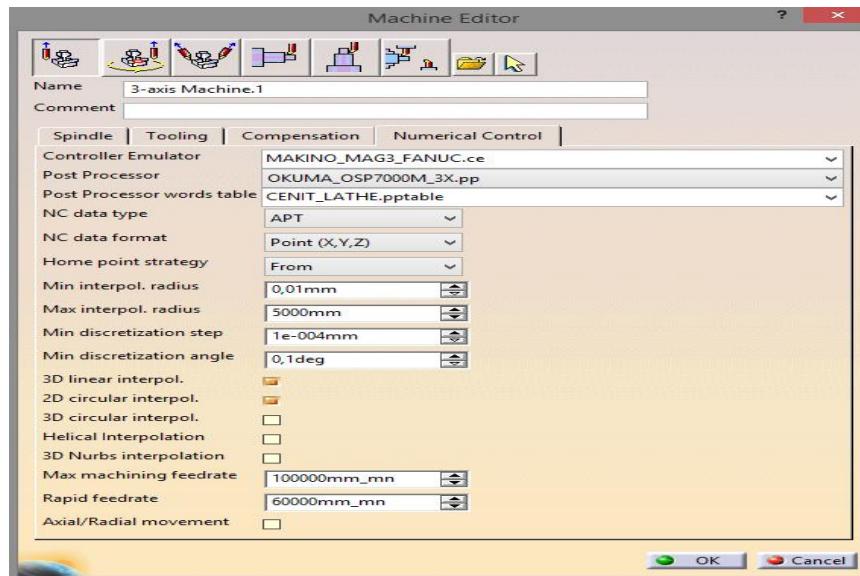


Figura 15 – Configuração do pós-processador

Para a maioria dos cascos, utilizaremos 3 operações de usinagem para obtenção do casco final. Em (2), devemos selecionar o ponto de referência criado. Em (3), (4) e (5) selecionamos o casco, o bloco e o plano criado anteriormente.

Após a configuração da máquina, iniciamos a usinagem com o botão de desbaste (botão “Roughing” no CATIA), que fará uma primeira remoção do material, mas não atingirá o nível de precisão de desejamos para nossos cascos (~0,1mm). Nesta operação podemos usar avanços de corte de 10mm, sem nenhum prejuízo ao trabalho final. Em seguida, utilizamos a operação de acabamento/ varredura (botão “Sweeping”) no CATIA, utilizando avanços menores (menores que 5mm), para aumentar a qualidade do acabamento do material. Durante as operações, é crucial garantir que as dimensões da ferramenta sejam fieis ao que é utilizado na realidade. Para aumentar o acabamento da peça, podemos utilizar a operação “Z-Level” do CATIA entre as operações de desbaste e varredura. Em cada uma dessas operações, a pessoa pode visualizar em vídeo o resultado da usinagem através do caminho “(MANUFACTURING PROGRAM.1 > MANUFACTURING PROGRAM.1 OBJECT > START VIDEO SIMULATION USING TOOL PATH)”.

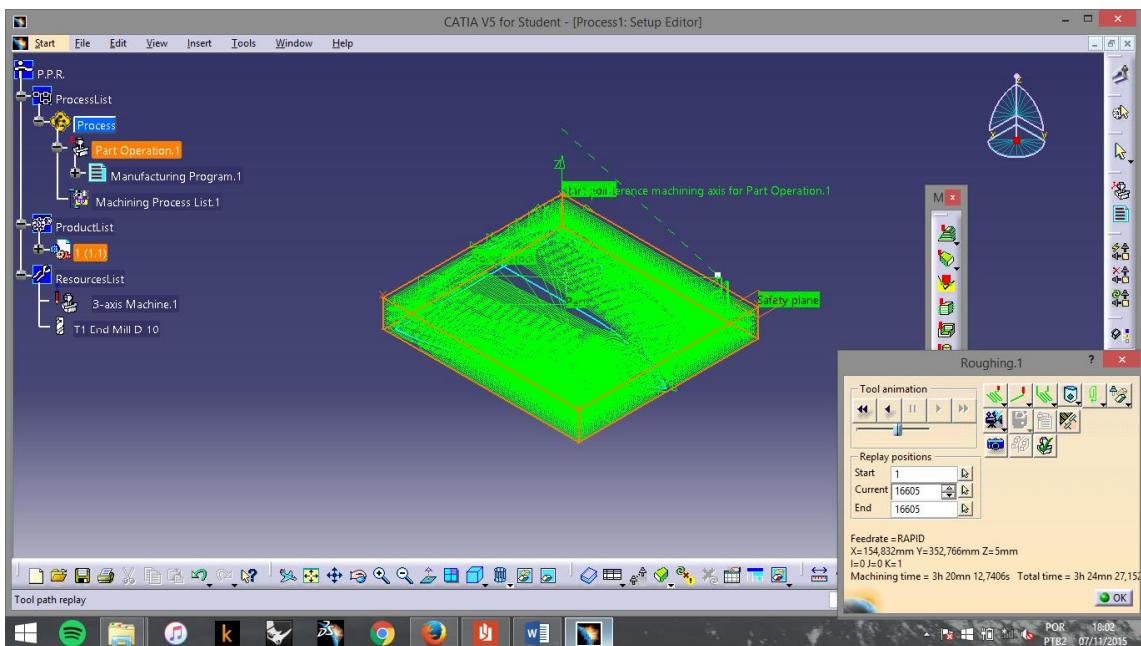


Figura 16 – Resultado da usinagem do casco

Por último, para a geração do código G Em **MANUFACTURING PROGRAM.1 > MANUFACTURING PROGRAM.1 OBJECT > GENERATE NC CODE INTERACTIVELY** configure as opções como na imagem abaixo e clique em **EXECUTE**. Para que o código G seja compatível com o LinuxCNC e funcione com as velocidades adequadas, devemos abrir o arquivo gerado e fazer algumas configurações:

- Apagar o comando H1

- Mudar a velocidade modificando o comando SXXXX
- Substituir o campo F1000 por F15000

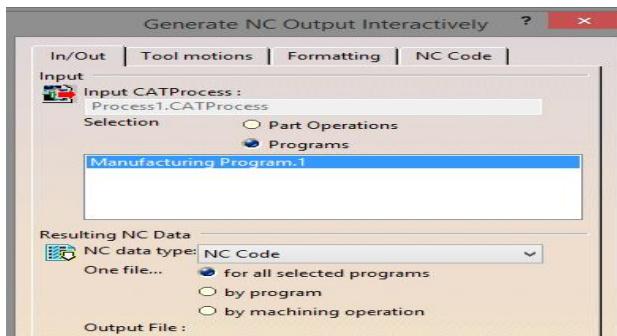


Figura 17 – Configuração para geração do código G

Todas as etapas descritas acima são explicadas passo-a-passo no tutorial de Usinagem CNC – Fresa presente em [48]. Além desse, outros tutoriais de CATIA podem ser obtidos nesta referência.

4.4.8.2. PROJETOS DA NAVAL

Projetos de conclusão de curso

O presente projeto está relacionado com outros projetos que estão sendo desenvolvidos pelo departamento de Engenharia Naval, que estão sendo coordenados pelo professor Bernardo. Os projetos tem como objetivos o estudo e otimização dos cascos e estrutura de embarcações e a apresentação de um método racional para construção das estruturas de navio, diminuindo gastos desnecessários de material (em especial para navios de planeio), sem deixar de garantir que a estrutura resista aos esforços necessários e que funcione adequadamente em navegação. Softwares de elementos finitos e CFD (*computational fluid dynamics*) são utilizados para melhorias da estrutura e casco, respectivamente. [49]

Agora, com a fresadora pronta, os modelos poderão ser construídos e ensaiados no tanque de provas da Universidade para validação dos resultados teóricos encontrados. Assim, o projeto é de grande importância para a consolidação dos outros projetos da naval e representa um avanço significativo na praticidade do trabalho de projetos que envolvam o ensaio de modelos no tanque de provas da universidade.

Projetos extracurriculares

Outros projetos utilizarão da Escola utilizarão a fresadora. O primeiro, e mais importante, é o projeto Poli Náutico. O Poli Náutico é uma iniciativa dos alunos da Naval, orientada pelo professor Bernardo e que conta com o apoio do departamento de Engenharia Naval da Escola.

O projeto consiste na construção de uma embarcação para participação da competição DUNA – Desafio Universitário de Nautimodelismo. O DUNA teve sua 3^a edição em 2015, em Joinville, recebendo mais de 10 universidades com 21 projetos. É um campeonato entre universidades, que devem projetar e construir um pequeno barco para participação de cinco provas:

- Prova de obstáculos
 - O barco deverá completar um circuito passando pelo lado indicado de cada boia. Essa prova tem o objetivo de avaliar a capacidade de manobra da embarcação através do tempo do percurso.
- Prova de corrida
 - O barco deverá realizar 4 voltas de um percurso, que não possui quantidade de curvas bem menor que a prova de obstáculos, no menor tempo possível, com o objetivo de medir a agilidade do barco.
- Cabo de guerra
 - Confronto direto entre duas equipes, onde o objetivo rebocar o barco adversário até uma marca determinada.
- Prova de força
 - O barco deve empurrar uma barcaça, com 220 kg, pelo circuito preestabelecido. Tem como objetivo premiar o barco com maior força e capacidade de manobra com carga.
- “*Bollard Pull*” (Tração estática) a ré
 - O objetivo da prova é verificar a embarcação de ofereça a maior tração estática a ré. O modelo é acoplado numa célula de carga, através de um cabo, e medições de força são realizadas por 12 segundos.

Além das competições citadas acima, os barcos devem seguir diversas especificações, como tamanho e peso máximo, não conter partes soltas, etc. Além disso, o design e projetos como um todo também são avaliados.

Além do projeto Poli Náutico, outros grupos de trabalho da Escola manifestaram interesse em utilizar a máquina.

4.5. ELETRÔNICA

No trabalho dos alunos Eduardo e Otávio, o dimensionamento dos motores foi feito na fase inicial do projeto para acelerar o processo de compra dos materiais. Neste dimensionamento, foram escolhidos servo motores AC de 200W para os eixos Y e Z e um servo motor AC de 400W para o eixo X, responsável pelo maior deslocamento de massa entre os três motores [2]. No processo de compras, o fornecedor de motores e drivers foi a Kastro, que trabalha com a marca Panasonic (Servo Motores AC – LIQI Series – 200 W e 400W – Panasonic – SR-ZSV0039).

4.5.1. INTEGRAÇÃO ENTRE MOTORES, DRIVERS E CONTROLADOR

A integração da parte eletrônica com o controlador, dispositivos sensores e os dispositivos de atuação (motores), acontece com esquematizado abaixo:

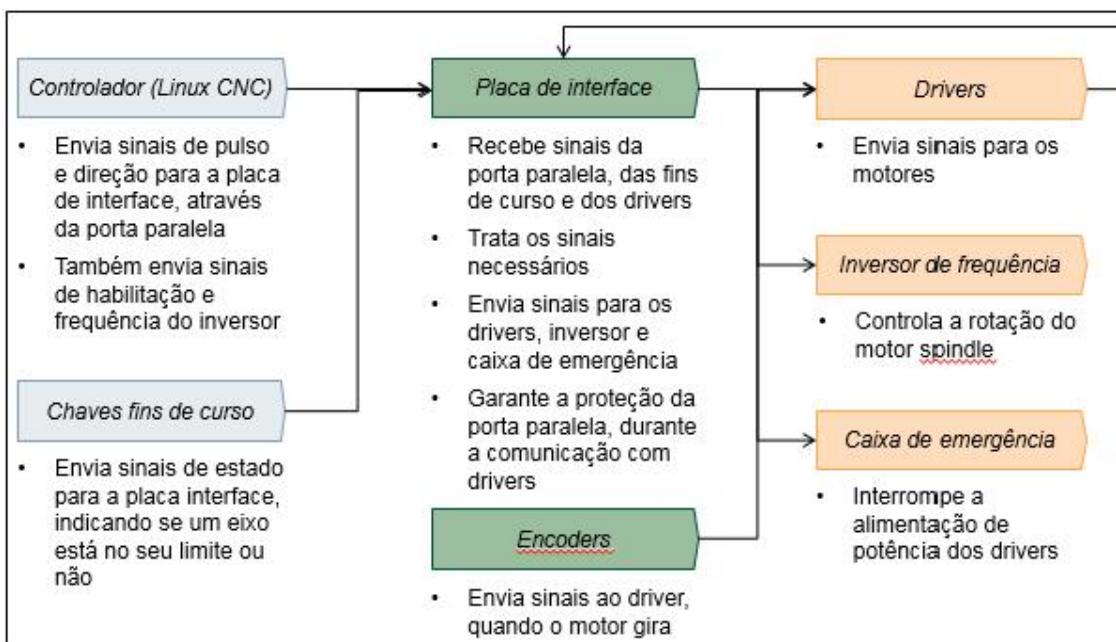


Figura 18 – Lógica simplificada da eletrônica do projeto

A placa de interface é a parte central do projeto eletrônico, pois garante a comunicação de todos os dispositivos da máquina. Será aplicado a seguir o funcionamento de cada bloco e como ocorre sua comunicação com a placa de interface e, consequentemente, com outros dispositivos.

4.5.1.1. DRIVERS

Os drivers são os elementos responsáveis por controlar o funcionamento dos motores servo AC dos 3 eixos da máquina. O driver utilizado é o MINAS LIQI (MBDJT2207) e seu *layout* está esquematizado abaixo:

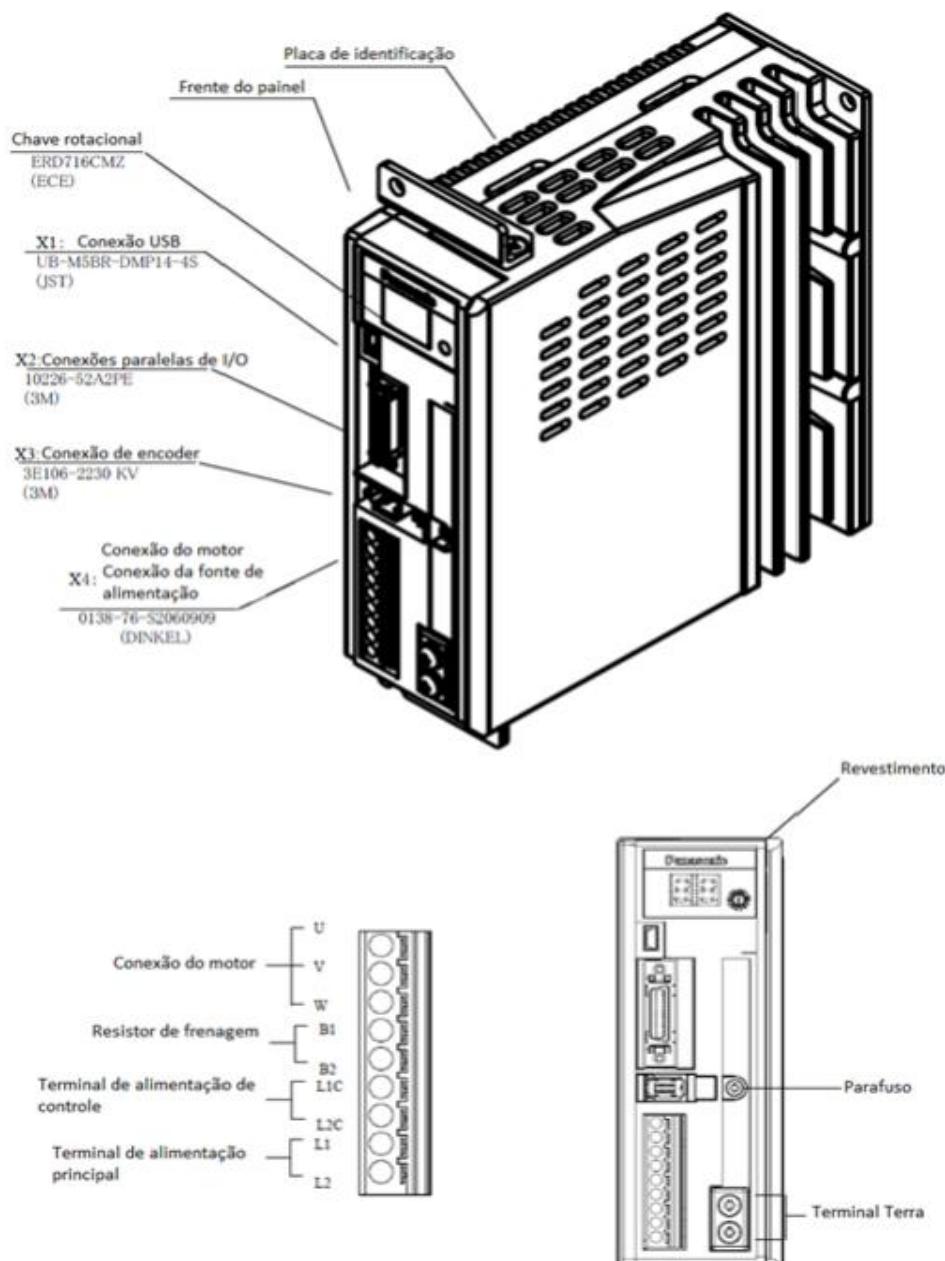


Figura 19 – Layout do Driver [1]

O driver LIQI possui interfaces para ligação com o motor (X4), interface para ligação com o *encoder* do motor (X3), conexão USB para configuração do driver (X1)

e conexão dos sinais de entrada e saída (X2).

A conexão X2 é principal interface do driver, pois nela entrarão os sinais de pulso e direção e sairão outros sinais, como por exemplo o sinal de alarme. A conexão X2, possui 26 pinos e seu esquema está representado abaixo.

3.1. Esquemático do conector X2 (Cabo de Controle)

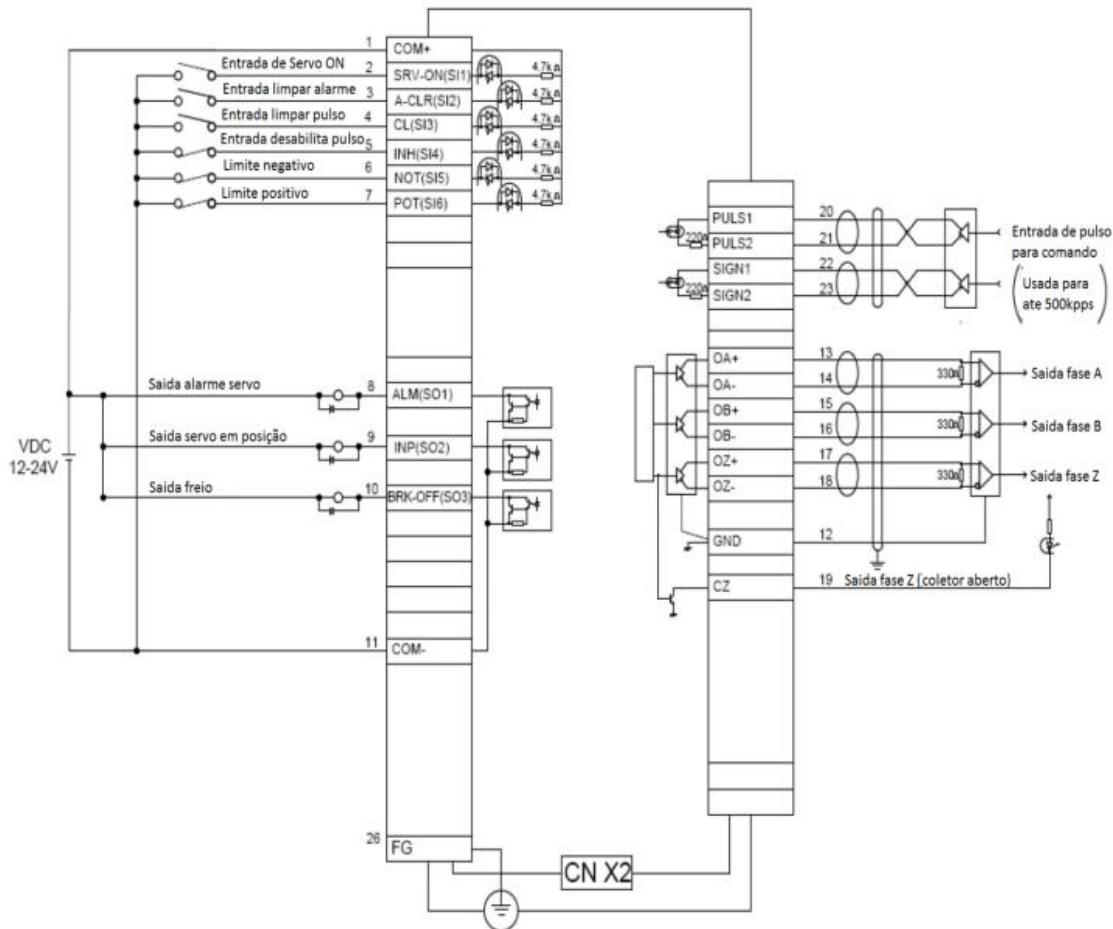


Figura 20 – Esquemático do conector X2 do driver [1]

Para realizarmos o controle da máquina, devemos primeiramente alimentar adequadamente o driver com 12 ou 24 volts no pino COM+ e 0 volts no pino COM-. Em seguida, devemos enviar sinais de pulso através das entradas PULS1 e PULS2 e direção através SIGN1 e SIGN2, sendo um uma entrada para o sinal propriamente dito e o outro como referência. Ainda, utilizamos o sinal de alarme (pino 8 – ALM) como “chave” para desligar a alimentação de potência. Não utilizamos os sinais dos pinos 13 ao 18 e o sinais dos pinos 9 e 10. Os sinais restantes foram utilizados como no esquema acima.

4.5.1.2. CIRCUITO DE INTERFACE

Mesmo com a presença do driver para o acionamento dos motores, a ligação do driver diretamente na porta paralela não é recomendável, ou, como no nosso caso, não é possível (pela presença de chaves fim de curso). A construção de um circuito para realizar a interface entre porta paralela e driver, possui algumas vantagens. [50]

Entre as principais vantagens, podemos destacar a possibilidade de implementar as chaves fim de curso, garantindo maior segurança à estrutura da máquina, e a amplificação dos sinais recebidos, garantindo menor corrente drenada para os drivers dos motores. [50]

No apêndice, temos uma folha com o esquema elétrico detalhado do circuito de interface. O circuito possui um conector que recebe os fios da porta paralela. Os sinais do controlador chegam através desse conector, passam por um buffer (CI 74LS541N) de oito entrada e oito saídas, onde as entradas são gravadas na saída, caso contrário, as sinais ficam todas em “*high impedance*” [52]. Esse dispositivo garante que pouca corrente esteja sendo drenada da paralela. Após passar pelo buffer, os seis primeiros sinais são distribuídos para os três drivers, sendo um sinal de pulso e outro sinal de direção. Os dois sinais restantes habilitarão o funcionamento do *spindle* e controlarão sua rotação. O primeiro sinal, de habilitação, ativa um fototransistor (CI 4N25M) [51], que faz com que a entrada digital I, receba o nível de tensão adequado para que o inversor possa funcionar. O segundo sinal, que é um pulso, é convertido num nível de tensão “constante”, através de um filtro de segunda ordem.

A placa ainda possui um conector para as chaves fim de curso, onde o sinal das seis chaves é recebido e distribuído para os três drivers. A placa ainda possui chaves para que o operador possa ativar ou desativar o sinal de habilitação dos drivers (SERVO-ON), bem como os sinais de reinicialização do driver. Cada driver, emite também alguns sinais de estado. Utilizamos um sinal de alarme de cada driver, para, através de uma porta lógica AND, formar um dos controles da caixa de emergência, que ativa ou desativa a alimentação de potência dos drivers. O sinal de alarme resultante e os sinais dos limites negativos da máquina, passam por um segundo buffer, que enviará sinais de retorno para a porta paralela, fazendo com que ela interrompa a execução do programa caso algum alarme seja ativado.

4.5.1.3. INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência é um dispositivo que permite o controle de velocidade de motores de indução trifásicos. No processo de compras, o inversor adquirido foi o da fabricante WEG. Ele permite opções de controle vetorial (VVW) ou escalar (V/f), ambos programáveis de acordo com a aplicação. No modo vetorial (VVW) a operação é otimizada para o motor em uso, obtendo-se um melhor desempenho em termos de regulação de velocidade. O modo escalar (V/f) é recomendado para aplicações mais simples como o acionamento da maioria das bombas e ventiladores. O modo V/f também é utilizado quando mais de um motor é acionado por um inversor simultaneamente (aplicações multimotores) [1].

Para o controle do nosso motor *spindle*, utilizamos o modo escalar, por ser mais simples de aplicar e por ser suficiente para nossa aplicação. Para o controle do motor *spindle*, utilizamos dois sinais enviados através da porta paralela.

O primeiro sinal é o de habilitação (“enable”), que permite que o inversor envie os sinais adequados de frequência ao *spindle*, caso receba o sinal de aumento de frequência.

O segundo é o sinal que define o nível de frequência ao motor *spindle*, que variando de 0V até o 10V, varia sua frequência de 0Hz até 18000Hz. Como o computador só envia sinais de pulso com 0 ou 5 volts, utilizamos um filtro de segunda ordem com a função de transformar o sinal pulsado em um nível de tensão, que pode variar entre 0 e 5 volts, e em seguida, alteramos um parâmetro do inversor, que é o ganho de entrada do sinal, para o valor 2, assim temos um sinal que varia entre 0 e 10 volts e que pode controlar a velocidade do motoro *spindle*. Abaixo estão as conexões de controle do inversor:

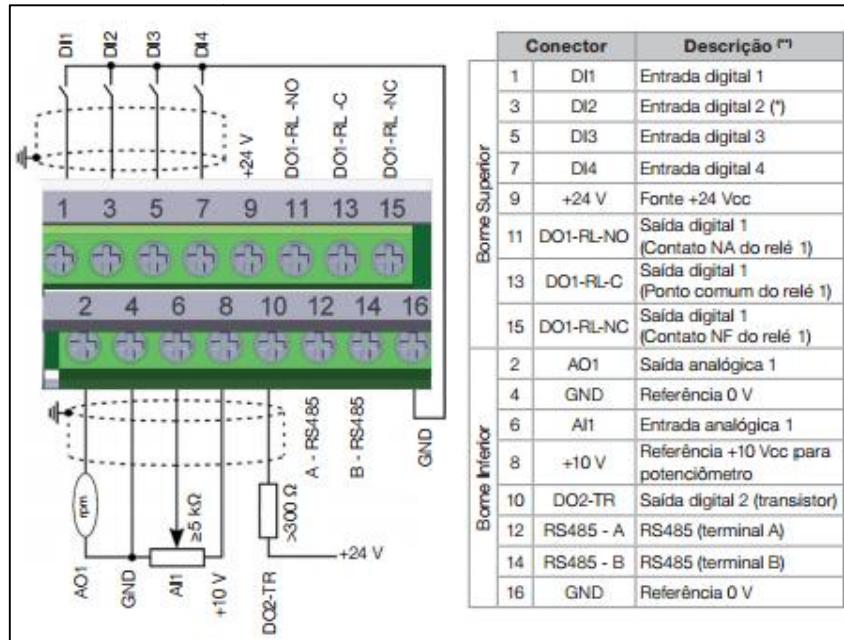


Figura 21 – Conexões de controle do inversor [2]

Utilizamos a entrada digital 1 (DI1) para enviar o sinal de *enable* e a entrada analógica 1 (AI1) para enviar o nível de tensão que controla a frequência do *spindle*.

4.5.1.4. GABINETE DE CONTROLE

Para fixar todos os elementos controladores da máquina, foi montado um gabinete. A primeira versão do gabinete está retratado na figura abaixo.

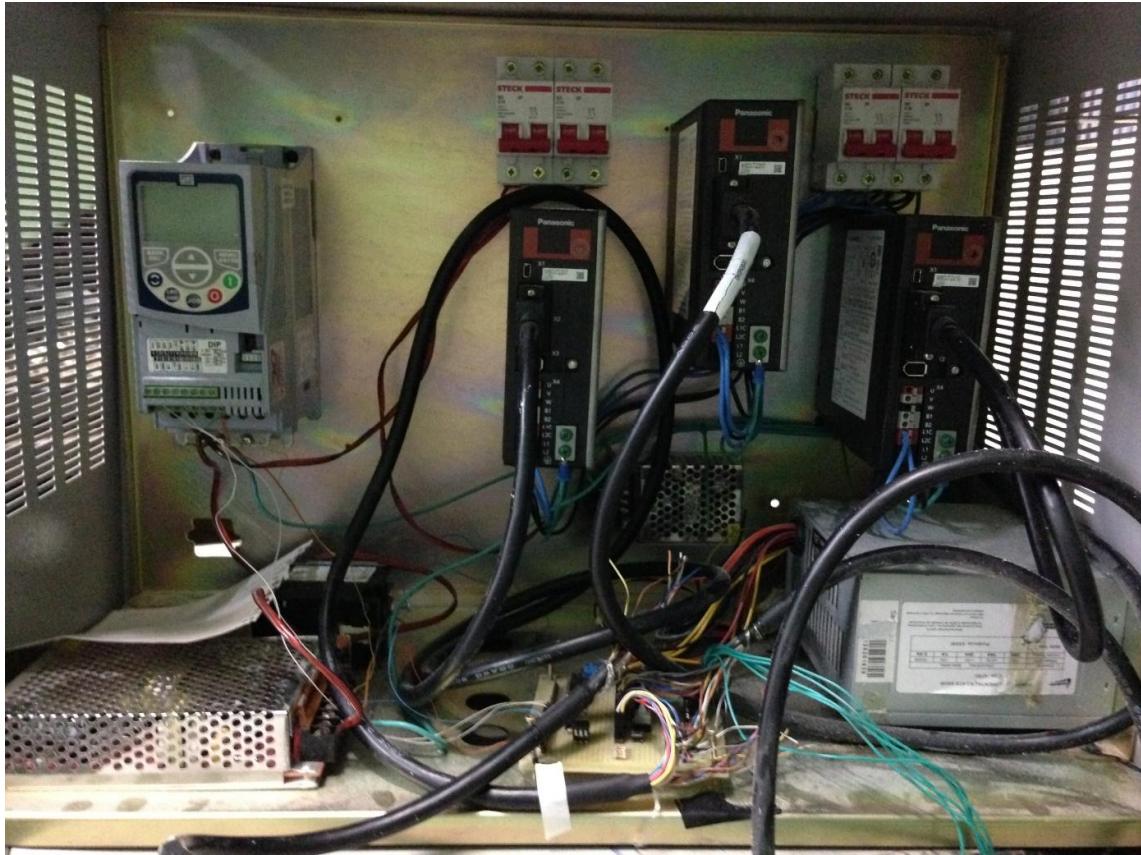


Figura 22 – Primeira versão do gabinete

Como podemos notar, essa primeira versão tinha alguns problemas. Entre eles:

- Falta de segurança e estabilidade nas ligações
- Má disposição dos elementos (as fontes e o circuito de interface estavam na horizontal, ficando mais suscetíveis ao pó)
- Falta de identificação das ligações

Após o funcionamento da máquina, um processo de melhoria do gabinete foi iniciado. Os primeiros passos foram a inclusão de um chapa de alumínio para montagem dos dispositivos, que foi fixado no fundo do gabinete e a fixação de calhas para passagem dos cabos. Uma figura do trabalho em progresso pode ser verificada abaixo:

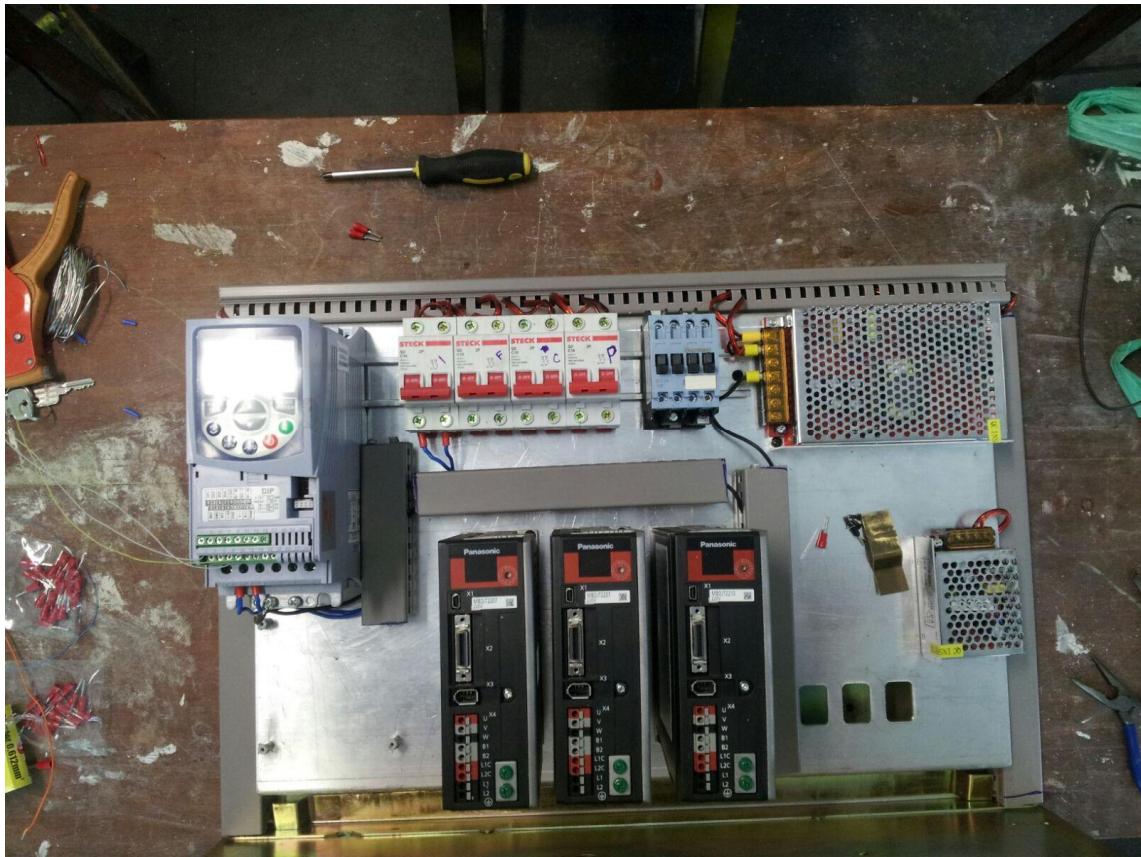


Figura 23 – Nova versão do gabinete em progresso

O novo gabinete tinha como objetivo deixar o menor número de cabos entrando do exterior diretamente até algum dispositivo. Para viabilizar isso, os fios saem dos dispositivos e vão até os painéis laterais do gabinete, onde foram colocados conectores, que são responsáveis por ligar os dispositivos externos até a máquina.

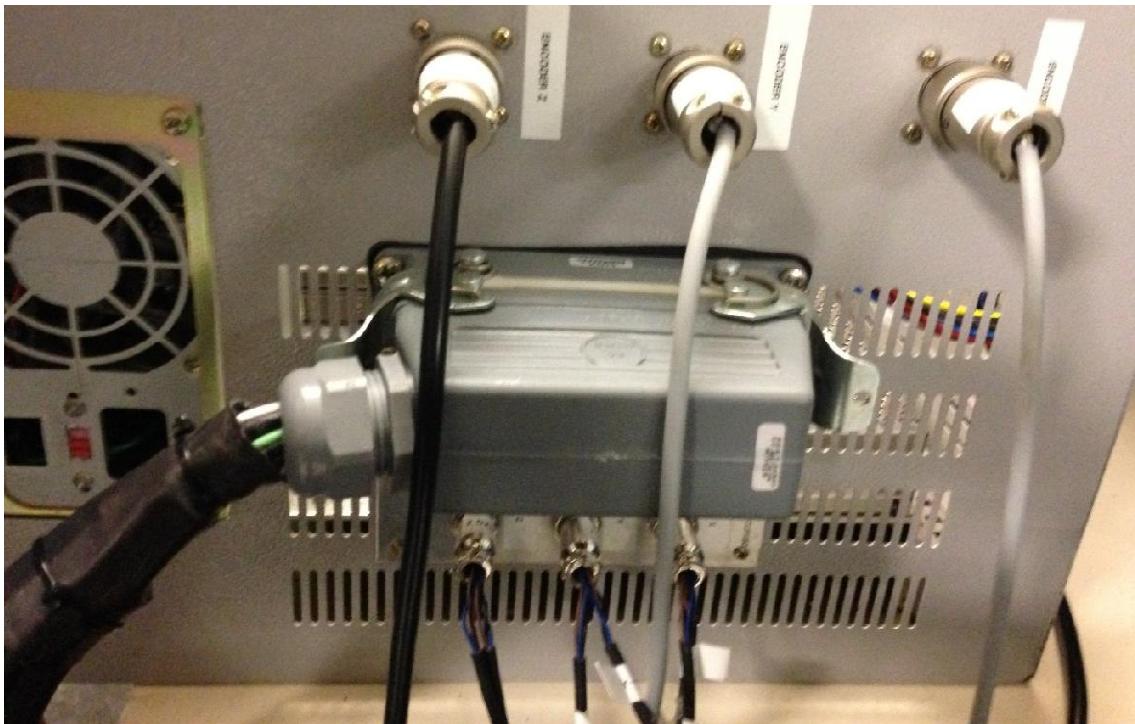


Figura 24 – Painel de conectores de comunicação com a máquina

No painel foram utilizados três tipos de conectores: conectores “Myke” para as chaves fins de curso, um conector de 28 pinos para as alimentações de potência dos motores (e também do freio do motor Z e da caixa de emergência) e três conectores de 8 vias para os sinais de *encoder*.

Com o objetivo de impedir que um usuário danifique a máquina, cada conector Myke conecta um par de fins de curso (por eixo), que não podem ser invertidos, pois o número de pinos de cada conector é diferente para cada eixo. O conector de 28 pinos também não pode ser conectado incorretamente, pois só encaixa em um determinado sentido. Os conectores não têm nenhuma proteção mecânica contra usuários mal preparados, mas os cabos e os conectores do painel foram devidamente identificados para evitar esse tipo de problema. Todos os elementos do gabinete foram devidamente identificados através de etiquetas, como mostrado nas próximas figuras:

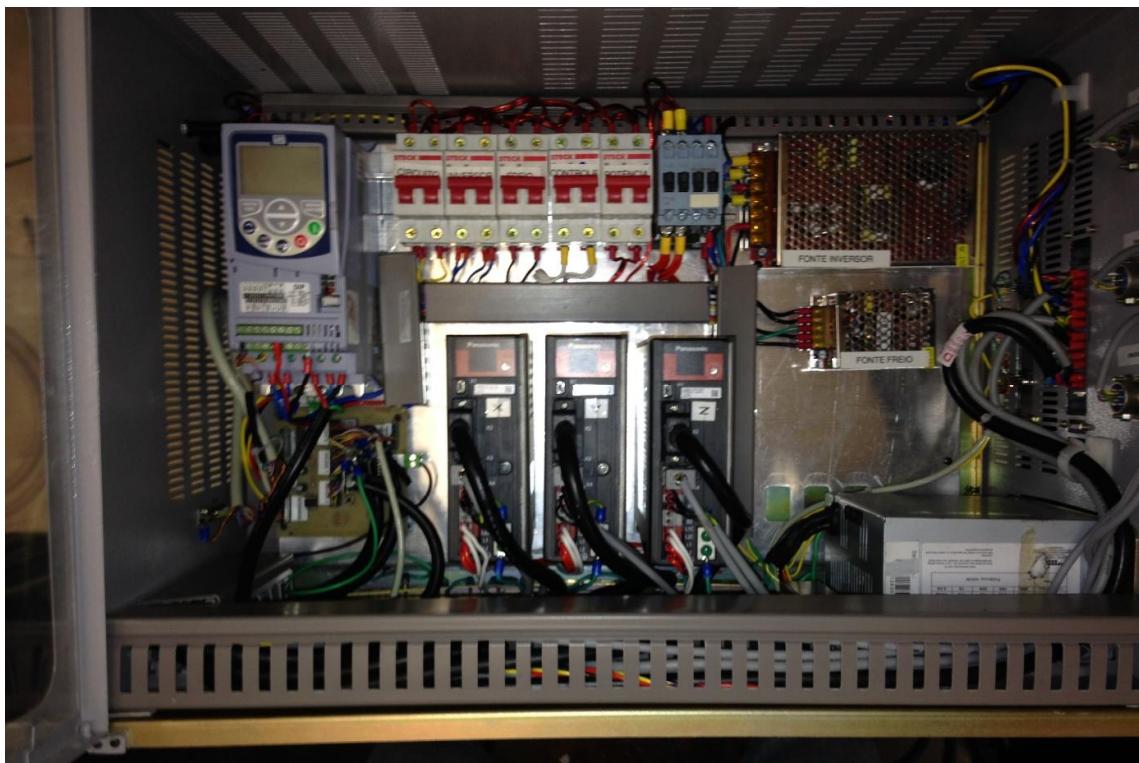


Figura 25 – Nova versão do gabinete, com elementos identificados (ver fontes e drivers)

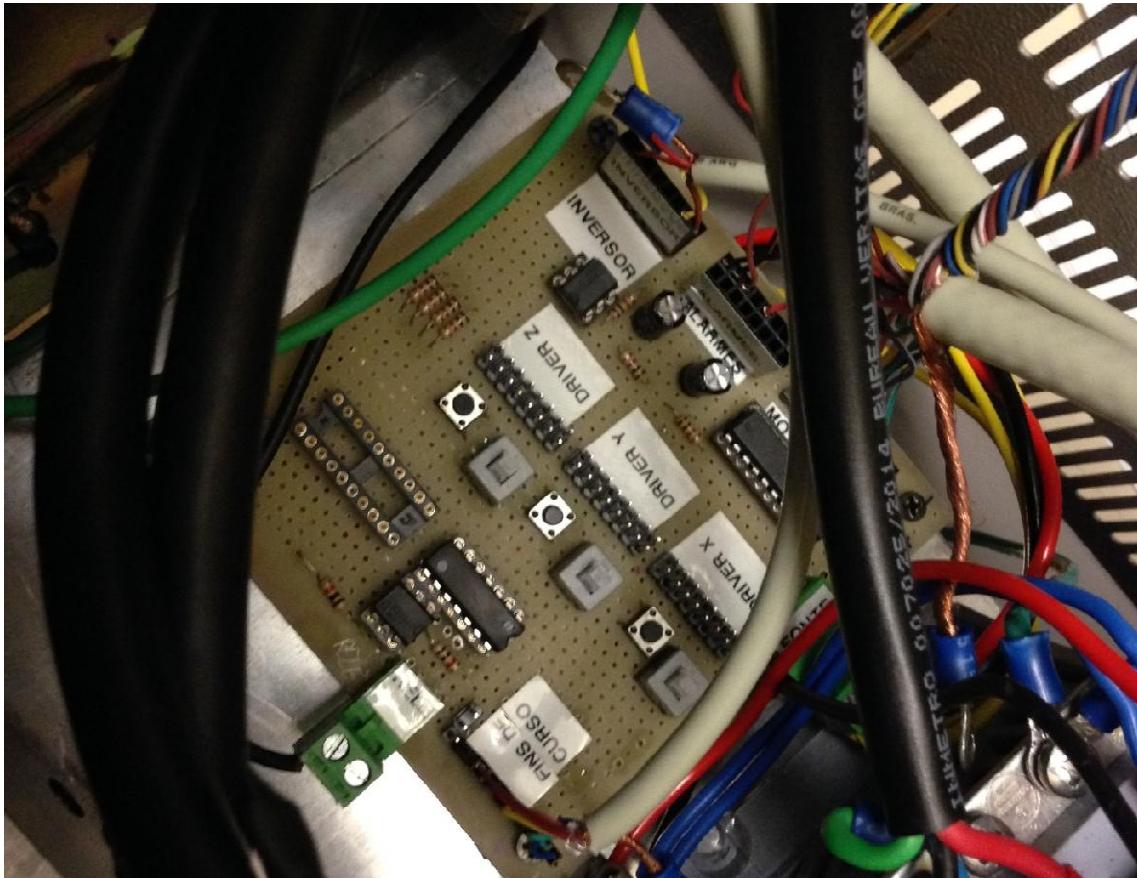


Figura 26 – Detalhe de identificação dos conectores do circuito de interface

No caso dos conectores do circuito de interface, as indicações presentes na placa foram feitas de tal forma que, o usuário perceberá se conectou o cabo da maneira adequada ou não, se a indicação do conector do cabo for coincidente com a marcação da placa.

Como notado nas figuras acima, o gabinete possui 5 disjuntores, que são responsáveis por proteger diferentes partes do gabinete:

- Fonte de alimentação lógica dos drivers e circuito de interface
- Fonte de alimentação do freio
- Alimentação do inversor (lógica e de potência)
- Alimentação de controle dos drivers
- Alimentação de potência dos drivers

Caixa de emergência

Visando aumentar a segurança da máquina, foi instalada uma caixa de emergência. A caixa controla alimentação de potência dos drivers, através de uma chave contadora, que tem sua bobina acionada ou desligada por 3 chaves presentes na caixa de emergência:

- Botão de emergência – botão que é NF, mas abre o contato caso seja ativado
- Botão de início – botão verde que fecha a contadora, permitindo o uso da máquina
- Sinal de alarme dos drivers (passam por uma porta lógica e são enviados para um relé na caixa de emergência)

A caixa foi confeccionada com um cabo longo para permitir que o operador possa andar com ela durante a operação da máquina.

4.6. PROCESSO DE COMPRA DOS MATERIAIS

O processo de compra dos principais materiais demorou aproximadamente dois anos. Ele foi iniciado pelos alunos Eduardo e Otávio que, mesmo se esforçando para acelerar a especificação dos materiais, não puderam fazer com que o pregão acontecesse em 2013.

O processo foi retomado em 2014 e o primeiro pregão foi realizado em Agosto desse ano. Infelizmente, nem todos os materiais puderam ser comprados nesse pregão. O pregão foi dividido em 6 lotes, onde cada fornecedor deveria ofertar todos os itens de pelo menos um determinando lote para poder participar da concorrência. Os lotes relativos aos perfis de alumínio e aço e ao de chapas de alumínio (lotes 3 e 6) foram concluídos, pelo mesmo fornecedor. O lote de motores (servo AC) e drivers tiveram como vencedor o fornecedor Kastro. O lote 3 (acoplamentos) foi vencido pela empresa Rolamentos Radial, que ofereceu ofertas para os itens do lote 4 (fusos e guias), mas seu preço estava em torno de 300% do valor teto do pregão para este item e o negócio não foi fechado. O lote 1 também não foi concluído, pois nenhum fornecedor apareceu no dia da concorrência. Abaixo está uma tabela resumo sobre os resultados do primeiro pregão:

Lote	Itens	Resultado (Fornecedor)
1	<i>Spindle</i> e Inversor	Não comprado. (Por falta de fornecedor)
2	Perfis de Alumínio e Aço	Comprado (LWM)
3	Acoplamentos	Comprado (Radial Rolamentos)
4	Fusos, Guias e Mancais	Não comprado. (Por falta de preço realista)
5	Motores e Drivers	Comprado. (Kastro)
6	Chapas de Aço e Alumínio	Comprado. (LWM)

Tabela 9 – Resumo do primeiro pregão

Para comprar os materiais dos lotes 1 e 4, um segundo pregão foi agendado para Setembro. Porém, o setor de compras da USP lançou o pregão no sistema de compras da USP com pouca antecedência ao dia do pregão e não avisou os interessados do projeto (professor Bernardo e departamento da Engenharia), além de não entrar em contato com nenhum fornecedor dos lotes. Nenhum fornecedor compareceu ao pregão, então nenhuma compra foi realizada.

Um terceiro pregão foi agendado para Novembro. Nele, os lotes restantes foram concluídos. A entrega dos fusos e guias envolveu alguma complicações. Um dos pares de mancais foi entregue com tamanho incorreto e um dos fusos veio com a medida incorreta e com erros de usinagem. Após a devolução desses materiais, conseguimos receber o material novamente depois de algumas semanas. Um resumo do terceiro pregão e um resumo geral das compras feitas através de pregões presenciais pode ser conferida abaixo:

Lote	Itens	Resultado (Fornecedor)
1	<i>Spindle</i> e Inversor	Comprado. (LWM)
4	Fusos, guias e mancais	Comprado. (Mectrol)

Tabela 10 – Resumo do terceiro pregão

Lote	Itens	Pregão	Fornecedor
1	<i>Spindle</i> e Inversor	3 ^a (Novembro)	LWM
2	Perfis de Alumínio e Aço	1 ^a (Agosto)	LWM
3	Acoplamentos	1 ^a (Agosto)	Radial Rolamentos

4	Fusos, Guias e Mancais	3 ^a (Novembro)	Mectrol
5	Motores e Drivers	1 ^a (Agosto)	Kastro
6	Chapas de Aço e Alumínio	1 ^a (Agosto)	LWM
	Total	3 ^a (Novembro)	Diversos

Tabela 11 – Resumo das compras realizadas através de pregões presenciais

4.7. PROCESSO DE MONTAGEM DA MÁQUINA

Logo após a compra dos materiais, iniciou-se a montagem da máquina. O processo foi iniciado com a adaptação e conclusão do projeto iniciado em [3]. As principais alterações no projeto anterior foram a adaptação do suporte do *spindle*, adaptação dos mancais e fusos e fixação das guias e das peças que ligavam os patins nos eixos da máquina. Além disso, foram incluídos os desenhos dos suportes dos motores.

O processo de montagem foi iniciado em conjunto com os técnicos do laboratório do PMR, que já no início identificaram problemas que tiveram que ser corrigidos para o prosseguimento do projeto, mostrando a importância de se aliar a teoria e prática nos projetos. O processo ainda permitiu que eu aprendesse a usinar as peças mais simples dos 3 eixos.

4.8. OPERAÇÃO DA MÁQUINA

4.8.1. FUNCIONAMENTO GERAL

O funcionamento geral da máquina funciona da seguinte maneira:

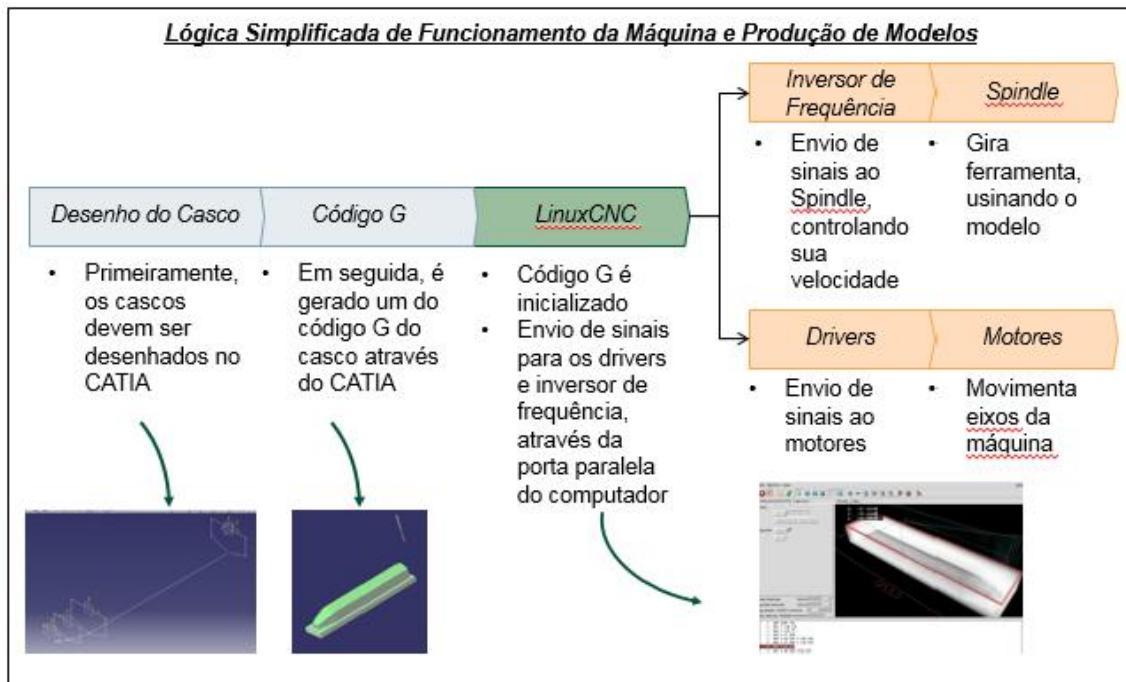


Figura 27 – Esquema simplificado do funcionamento geral da máquina

4.8.2. MANUAL DE OPERAÇÃO

Como a máquina será utilizada por diversos alunos, é necessário estabelecer uma série de medidas de segurança e um guia simples para que um aluno leigo consiga operá-la. Essa operação será descrita a seguir.

Antes mesmo de começar a mexer na parte eletrônica ou de comando da máquina, devemos fixar o bloco e ferramenta adequados para a usinagem a ser realizada. A ferramenta a ser utilizada, deve ser devidamente fixada no *spindle*, com a pinça de tamanho correspondente ao diâmetro da ferramenta (no caso da máquina, os tamanhos de pinça variam de 1mm-13mm), preferencialmente ultrapassando um pouco o limite da pinça e nunca preenchendo menos de 2/3 de seu diâmetro. Essas e outras medidas de segurança do *spindle*, podem ser conferidos no manual do fabricante.

Para fixação do bloco a ser usinado, recorremos ao uso de fita dupla face com capacidade de carga de 70kg. Apesar de parecer pouco profissional, esse processo é utilizado por empresas do ramo em usinagens semelhantes, tendo sido indicado pela empresa Intermarine. O bloco deve ser fixado com cuidado, sem excesso de fita (uma fita em cada borda basta), pois isso prejudicará sua remoção no futuro. A mesa da máquina receberá furos para permitir sua fixação usando peças auxiliares.

Primeiramente, devemos conferir se todos os cabos estão devidamente conectados. Todos os cabos e conectores estão identificados de tal forma que, se o usuário casar a indicação da etiqueta com a indicação do conector, a conexão estará certa. Além disso, várias conexões potencialmente prejudiciais foram impedidas mecanicamente, como a inversão de fins de curso, que se invertidas não ativariam sinal de alarme nenhum, mas não impediriam que um eixo chegasse ao seu limite, dando uma falsa sensação de segurança. As poucas conexões que podem ser invertidas resultam em um comportamento estranho dos motores, com posterior ação do driver, que o aciona algum tipo de alarme e o desliga.

Em seguida devemos ligar o computador e inicializar o LinuxCNC. Em seguida, devemos ligar o cabo de alimentação (220V) do gabinete e verificar se a luz indicativa de tensão se acende.



Figura 28 – Inicialização do LinuxCNC e região da alimentação geral, LED indicativo e chave do gabinete

Devemos conferir que os 5 disjuntores estão acionados e, só então ligar a chave geral do gabinete e conferir 3 processos:

- Um barulho agudo de curta duração deve ser ouvido, indicando o acionamento do freio do motor z
- Os LED's de todas as chaves fins de curso devem estar acesos
- O painel do inversor de frequência deve acender
- Os painéis dos drivers devem se acender e indicar “--” ou “Pc” (caso os botões de “Servo-On” manuais já estejam ativados)

Conferindo todos esses pontos, o operador pode iniciar a operação da máquina apertando o botão verde da caixa do operador (os *drivers* podem emitir um sinal de falta de potência, caso fiquem muito com sua alimentação ligada sem a liberação da contadora, neste caso devemos resetar o alarme através de um botão manual da

placa (ou começar o processo novamente). O próximo passo é alterar o estado do inversor de “Local” para “Remoto” através do botão “LOC/REM”. Esse processo permite que o inversor seja operado pelos seus sinais lógicos de entrada.

Finalmente podemos carregar o programa desejado no LinuxCNC, através do menu “File->Open” e desativar a parada de emergência do software (tecla F1 do teclado).

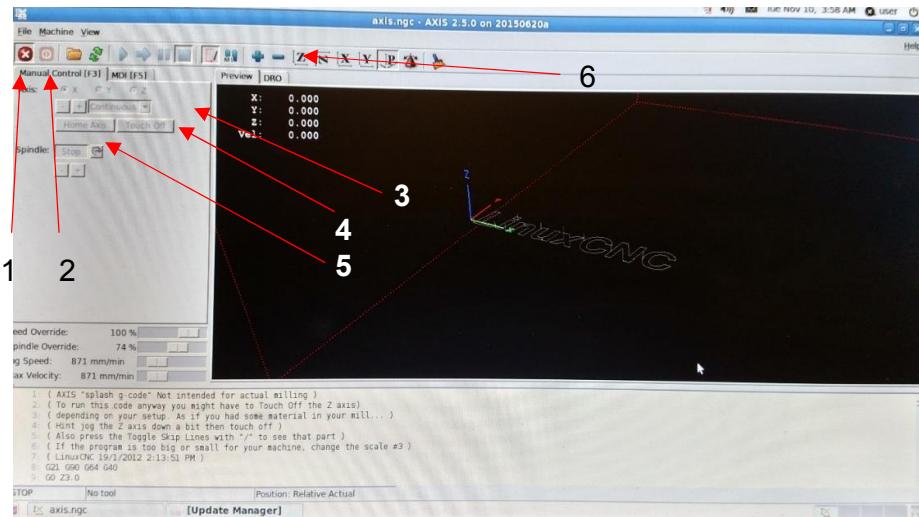


Figura 29 – Tela de operação do LinuxCNC

Acompanhando o esquema acima, devemos realizar os seguintes passos.

- Diminuir a velocidade máxima de *jog* (através do cursor presente em “*Jog Speed*”) para aproximadamente 1000mm/min bem como a velocidade máxima da máquina (através do cursor presente em “*Max Velocity*”)
- Desabilitar o botão de “*Stop*” ao lado de “*Spindle*”. O *spindle* deve começar a girar em sua velocidade mínima (configurada durante o *stepconf*)
- Utilizar os botões das regiões 3 e 4 para mover a máquina em modo manual, através de *jogs*, até o ponto 0 da peça no eixo x, usando a borda da peça como referência. As caixas de seleção da região 3 selecionam o eixo e os botões de “+” e “-“ da região 4 movimentam o eixo selecionado. Durante a aproximação é recomendável mudar o menu de *dropdown* presente na região 4 para uma medida pequena (por exemplo, 0.1 mm) e perceber se a ferramenta começa tocar a peça (é possível ouvir um pequeno barulho nesse momento). Clique em “*Home Axis*”
- Repetir o passo anterior para os outros eixos (voltar o menu *dropdown*

para “Continuous”) e no final suba o eixo para um posição próxima do ponto 0 definido e com uma certa distância vertical da peça

- Realizar o processo de aquecimento do *spindle*. Para isso, devemos aumentar a velocidade do *spindle* utilizando o botão de “+” próximo de “Spindle” até o painel do inversor demonstrar uma rotação de aproximadamente 9000rpm, que corresponde a 50% de sua rotação máxima, e esperar 5 minutos. Depois elevamos sua velocidade até a faixa 12000rpm e esperar mais 5 minutos. Caso o *spindle* esteja mais de 15 dias sem uso, ele deve ficar 30 minutos numa velocidade média de 5000 rpm antes de ser iniciado o processo acima.
- Ligue o sistema de ventilação da máquina (no momento utilizamos ventiladores para que o pó da usinagem se afaste da máquina, mas o departamento da Naval pretende providenciar um sistema de ventilação mais adequado)
- Inicie a execução do programa clicando no botão “*Play*” da região 6

Nesse momento começará a execução do programa. O operador deve acompanhar a execução do programa durante todo processo de fabricação. Em caso de emergência, o operador deve recorrer aos diversos meios de se interromper o programa (botão de emergência da caixa de emergência, tecla de emergência do LinuxCNC e a chave geral do gabinete).

Conforme a execução do programa avance o operador sinta que nenhum erro grande pode acontecer, ele pode aumentar a velocidade de execução do programa pelo cursor do LinuxCNC (é recomendado que ele pause a execução do programa com o botão “*Stop*” da região 6).

4.9. RESULTADOS

4.9.1. PRIMEIROS TESTES

Os primeiros testes foram realizados em Maio, com a máquina atuando em 2D e em velocidade reduzida (<5% da velocidade total da máquina). Após a instalação do terceiro eixo e do controle do motor *spindle*, foi realizada a usinagem de um casco do ensaio de Fridsma. A operação foi realizada utilizando isopor de

baixa densidade. A velocidade de média de usinagem utilizada foi de aproximadamente 1800mm/min (12% da velocidade máxima), pois a máquina ainda estava sem chaves fim de curso. A conclusão de sua metade traseira (foto abaixo), demorou em torno de 2 horas e meia.

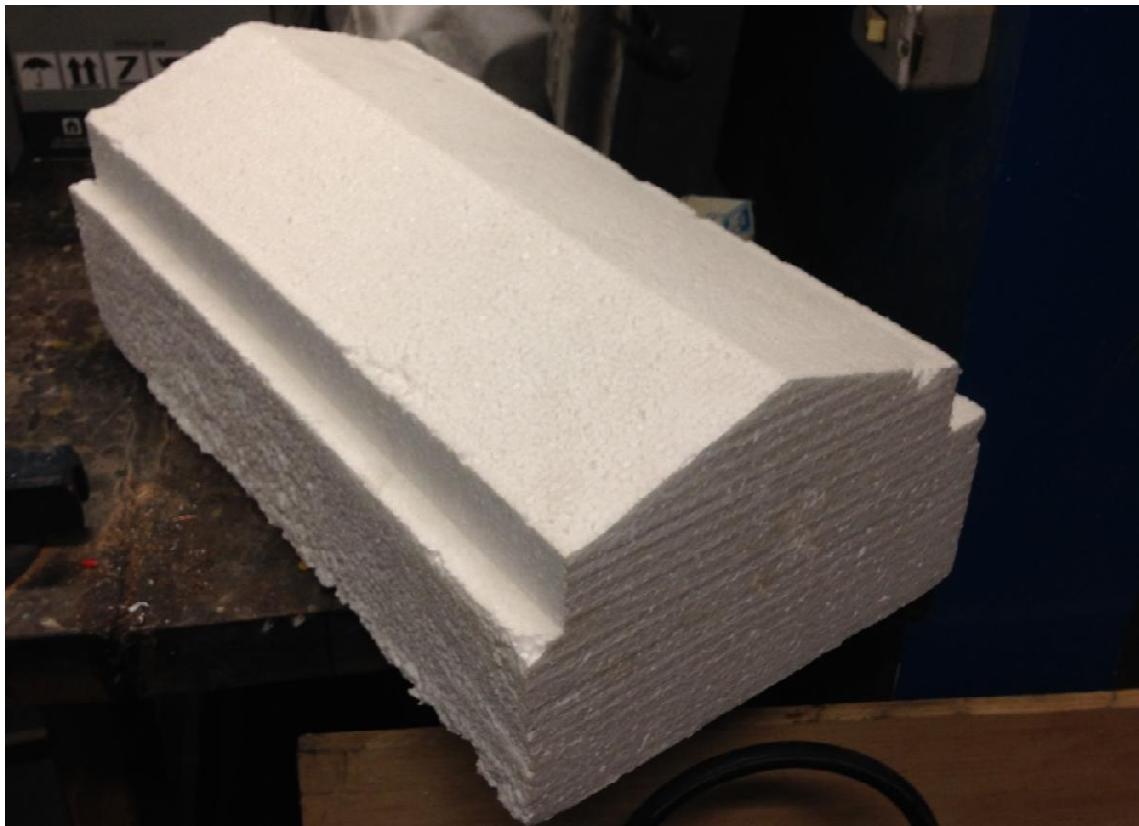


Figura 30 – Metade traseira do primeiro casco usinado pela máquina

4.9.2. CONFECÇÃO DO BARCO DA EQUIPE POLI NAÚTICO

Após a inclusão das chaves fins de curso, a máquina ficou à disposição da equipe Poli Náutico, para confecção do seu barco que iria competir no DUNA. O molde do barco foi feito em poliuretano, usinado com uma ferramenta de 2 dentes e rotação de 12 mil Hz a velocidade média de usinagem ficava em torno 5000 mm/min (33% da velocidade máxima da máquina), apenas por precaução. Os avanços

máximos foram de 5mm, metade do diâmetro da ferramenta de corte (10mm).

Devido a geometria específica do casco, as ferramentas de fresa convencionais disponíveis na Escola não permitiam que a máquina usinasse o casco inteiro de uma só vez. Para contornar o problema, os alunos do Poli Náutico dividiram o programa do casco em 12 partes (4 cortes de profundidade e 3 cortes longitudinais). Ao final da usinagem, cada peça era retirada do grande bloco de poliuretano, faceada na máquina e, em seguida, colada nas outras peças que formariam o barco. Abaixo temos uma foto de peças usinadas na fresadora que foram unidas para formar o casco.



Figura 31 – Peças para união e confecção do barco

Com o barco pronto (molde do barco, na verdade). Os alunos fizeram a laminação do casco, com a ajuda da empresa Intermarine. O casco do barco após a laminação podem ser conferidos nas figuras abaixo.



Figura 32 – Casco Poli Naútico

Os principais objetivos foram atingidos com a máquina. Foi verificado que se programarmos pequenos passos durante a usinagem da máquina, atingimos a precisão esperada (considerando os possíveis erros causados pelo desbaste excessivo do poliuretano).

O poliuretano apresentou um problema não mapeado no começo do projeto. As partículas de pó geradas pela usinagem são extremamente finas, com tendência de aderirem a materiais metálicos, podendo causar o entupimento dos rolamentos dos fusos e dos patins das guias. Por esse motivo, utilizaremos isopor de alta densidade como substituto ao poliuretano.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho aborda todas as principais áreas da Engenharia Mecatrônica e foi uma grande ferramenta de aprendizado. A revisão do projeto mecânico apontou alguns erros, que na verdade eram mínimos e não alteraram o projeto. Alguns ajustes foram feitos após a compra dos materiais, pois as especificações do produto do vencedor do pregão funcionam melhor com alguns ajustes em relação ao projeto inicialmente proposto. Essas alterações também não alteram de forma prejudicial o trabalho.

A parte eletrônica também se mostrou uma grande fonte de aprendizado no projeto. Diversos aspectos práticos que nunca haviam sido experimentados tiveram impacto no projeto. A problemática de ruídos, a montagem de um gabinete semiprofissional e o processo de entender como utilizar diferentes elementos (drivers, inversores, chaves indutores fins de curso, entre outros) contribuíram para que a experiência com a parte eletrônica do projeto fosse interessante.

No processo de montagem da máquina, tive a oportunidade de interagir diretamente com os técnicos do laboratório do PMR e aprender o básico sobre usinagem.

Apesar do caótico processo de compras, que demorou muito mais que o previsto, a máquina foi concluída e o projeto foi uma grande experiência para o meu desenvolvimento como engenheiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Panasonic, Technical Reference - AC Servo - Minas-LIQI Series, Osaka, 2012.
- [2] WEG, Inversor de Frequência - CFW500 - Manual do usuário, WEG, 2015.
- [3] E. C. d. M. P. Lima e O. C. K. d. Santos, Fresadora CNC de 3 eixos para usinagens de modelos de embarcações, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.
- [4] P. J. Hoffman, E. S. Hopewell, B. Janes and K. M. Sharp, Precision Machining Technology, New York: Delmar Cengage Learning, 2012.
- [5] R. L. Stoeterau, Introdução ao Projeto de Máquinas-Ferramentas Modernas, 2009.
- [6] Y. Altintas, Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design 2nd ed., New York: Cambridge University Press, 2012.
- [7] A. H. Slocum, Precision Machine Design, New Jersey: Prentice-Hall, 1992.
- [8] D. A. Orsioli, Estudo da relação entre os parâmetros do processo de injeção em alta pressão de espuma rígida de poliuretano na Indústria de Refrigeração, Joinville: UDESC, 2005.
- [9] F. P. d. Silva, Usinagem de Espumas de Poliuretano e Digitalização Tridimensional para Fabricação de Assentos Personalizados para Pessoas com Deficiência, Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- [10] Vilar, “Poliuretanos,” 2004. [Online]. Available: <http://www.poliuretanos.com.br/>. [Acesso em 10 Maio 2014].
- [11] Wikipedia, “Parallel Port,” [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Parallel_port. [Acesso em 10 Maio 2014].
- [12] J. A. N. C. Júnior, “Mini-curso: Interfaceamento pela porta paralela de um PC,” [Online]. Available: <http://www.cocotajr.cjb.net>. [Acesso em 10 Maio 2014].
- [13] Mitsubishi Electric, General-Purpose AC Servo - EZMOTION MR-E Super, General-Purpose Interface, May: Mitsubishi Electric, 2008.
- [14] A. H. d. A. Melani e T. d. S. Pereira, Desenvolvimento de uma máquina CNC para produção de peças de materiais compósitos para enrolamento filamentar, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.
- [15] T. Maia, “Smart Lights,” [Online]. Available: <http://www.scribd.com/doc/60434707/Smart-Lights>. [Acesso em 17 May 2014].
- [16] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, "4N25M, 4N26M, 4N27M, 4N28M, 4N35M, 4N36M, 4N47M General Purpose 6-Pin Phototransistor Optocouplers," January 2009. [Online]. Available: <http://www.fairchildsemi.com/ds/4N/4N35M.pdf>. [Accessed 17 Maiy 2014].
- [17] National Semiconductor, “DS26LS31CN Datasheet (PDF) - National Semiconductor,” June 1998. [Online]. Available: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/8421/NSC/DS26LS31CN.html>. [Acesso em 17 May 2014].
- [18] C. D. Padovezi, “A importância do projeto hidrodinâmico de cascos e de sistemas de propulsão de navios,” [Online]. Available: <http://www.ipen.org.br/articulos/a-importancia-do-projeto-hidrodinamico.pdf>. [Acesso em 10 May 2014].
- [19] LinuxCNC.org, “About the Software LinuxCNC,” [Online]. Available: <http://www.linuxcnc.org/index.php/about>. [Acesso em 30 April 2014].

- [20] LinuxCNC.org, “LinuxCNC Forum,” [Online]. Available: <http://www.linuxcnc.org/index.php/english/forum/index>. [Acesso em 2 May 2014].
- [21] LinuxCNC.org, “LinuxCNC Getting Started v2.5,” 9 May 2014. [Online]. Available: <http://linuxcnc.org/docs/2.5/>. [Acesso em 10 May 2014].
- [22] LinuxCNC.org, “Build a Simulator Manually,” 13 November 2013. [Online]. Available: http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?Build_A_Simulator_Manually. [Acesso em 24 May 2014].
- [23] LinuxCNC.org, “LinuxCNC Pure Simulator,” 20 August 2012. [Online]. Available: http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?LinuxCNC_Pure_Simulator. [Acesso em 24 May 2014].
- [24] Mach3, “Mach3,” 2014. [Online]. Available: <http://www.machsupport.com/software/mach3/>. [Acesso em 23 May 2014].
- [25] LinuxCNC.org, “INI Configuration,” 30 May 2014. [Online]. Available: http://www.linuxcnc.org/docs-devel/html/config/ini_config.html. [Acesso em 24 May 2014].
- [26] LinuxCNC.org, “AXIS GUI,” 30 May 2014. [Online]. Available: <http://www.linuxcnc.org/docs-devel/html/gui/axis.html>. [Acesso em 24 May 2014].
- [27] Wiki LinuxCNC.org, “Simple LinuxCNC G-Code Generators,” 2013. [Online]. Available: http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?Simple_LinuxCNC_G-Code_Generators. [Acesso em 29 May 2014].
- [28] CadTutorials Blogspot, “CATIA V5 - How to Generate G-codes in NC mode,” 2012. [Online]. Available: <http://mtm-cadtutorials.blogspot.com.br/2012/02/catia-v5-how-to-generate-g-codes-in-nc.html>. [Acesso em 30 May 2014].
- [29] AskUbuntu.com, “How to fix “The system is running in low-graphics mode” error?,” 2012. [Online]. Available: <http://askubuntu.com/questions/141606/how-to-fix-the-system-is-running-in-low-graphics-mode-error>. [Acesso em 24 May 2014].
- [30] LinuxCNC.org, “Forum - Topic: Problems with new computer,” 2014. [Online]. Available: <http://www.linuxcnc.org/index.php/english/forum/38-general-linuxcnc-questions/27627-problems-with-new-computer#45022>. [Acesso em 24 May 2014].
- [31] LinuxCNC.org, “TroubleShooting,” 2014. [Online]. Available: http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?TroubleShooting#Installing_Software_based_OpenGL. [Acesso em 28 May 2014].
- [32] LinuxCNC.org, “Forum-Topic: EMC cannot run after installing,” 2009. [Online]. Available: <http://www.linuxcnc.org/index.php/french/forum/9-installing-linuxcnc/472-emc-cannot-run-after-installing>. [Acesso em 28 May 2014].
- [33] Z. T. Q.Zang, “Multi-point sandwich forming of a spherical sector,” *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 74-80, Three April 2007.
- [34] FB Design, “Research and Development,” 2013. [Online]. Available: <http://www.fbdesign.it/R&D.php>. [Acesso em 31 May 2014].
- [35] CMSNA, “Large Dimensions Models,” 2014. [Online]. Available: http://www.cmsna.com/251_large_dimensions_models.php. [Acesso em 31 May 2014].
- [36] Drew Simmonds Patterns, “Welcome to Drew Simmonds Polymodels Ltd,” 2013. [Online]. Available: <http://www.polystyrene-modelmaking.co.uk/>. [Acesso em 31 May 2014].
- [37] ShopBot, “Meet ProDesign 3D, a custom design/build firm for exacting boatbuilding

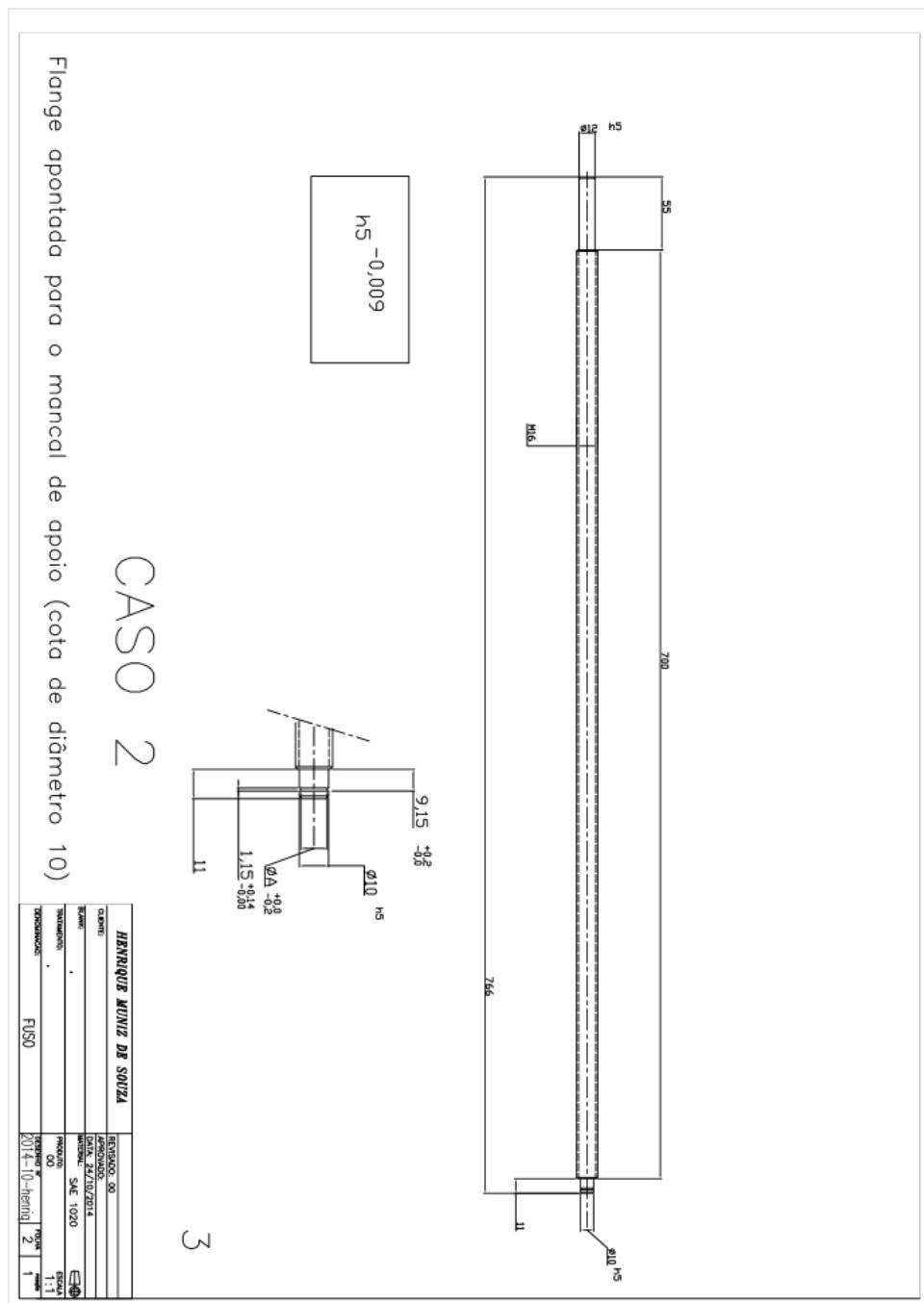
- customers,” 2014. [Online]. Available: <http://www.shopbotblog.com/index.php/2014/02/meet-prodesign-3d-a-custom-designbuild-firm-for-exacting-boatbuilding-customers/>. [Acesso em May 2014].
- [38] S. F. Malak e I. A. Anderson, “Orthogonal cutting of polyurethane foam,” *International Journal of Mechanical Sciences* 47, p. 867–883, 1 June 2005.
- [39] SdsPlastics.com, “Machining of Polyurethanes,” [Online]. Available: http://www.sdsplastics.com/polyurethane_machining.html. [Acesso em 2 June 2014].
- [40] H. Dehnavi, A. Naebi, M. R. Movahhedy e S. Pasban, Prediction of the Effect of Heat Generation in Ballscrew on the Accuracy of CNC, 14th International Conference on Modelling and Simulation, 2012.
- [41] W. Fuzhong, CNC milling Machine Spindle Characteristics Analysis by FEM, Shaoxing: International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2010.
- [42] C. X. Z. Z. X. J. Xuxiao Fan, Vibration Testing and Analysis of Dynamics Characteristics of a Reconfigurable Turn-milling Machine Tool, Beijing: International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2010.
- [43] L. Kang-Ju, L. Yong-Xan e Z. Zhe, Research in Multiple factors Vibration Controlling of CNC, Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2011.
- [44] B. Zhao, P. Yang, K. Chen e J. Gao, Research on Life of Machine Accuracy and Precision Reliability Assessment Concerning about a Turn-Milling Combined Machine Tool, Xi'an: IEEE, 2011.
- [45] Hurco, “Why NuCon Chose Hurco VMX42SR 5-Axis Machining Centers,” 2012. [Online]. Available: <http://www.hurco.com/IN/why-hurco/success-stories/blog/archive/2012/10/10/why-nucon-chose-hurco-vmx42sr-5-axis-machining-centers.aspx>. [Acesso em 2 June 2014].
- [46] LinuxCNC.org, “Touchy GUI,” 2011. [Online]. Available: <http://www.linuxcnc.org/docs-devel/html/gui/touchy.html>. [Acesso em 2 June 2014].
- [47] OBR Equipamentos Industriais, “Fusos de Esferas,” 2014. [Online]. Available: http://www.obr.com.br/catalogos/OBR_fusos.pdf. [Acesso em 31 May 2014].
- [48] HIWIN, “Ballscrew Technical Information,” 2012. [Online]. Available: <http://www.hiwin.com/pdf/bs/ballscrews.pdf>. [Acesso em 4 June 2014].
- [49] Hiwin, “AC Servo Motor & Drive Technical Information,” 2012. [Online]. Available: http://www.hiwin.com/pdf/servoMotors/AC_Servo_Motor_Drive_e%20copy1210.pdf. [Acesso em 4 June 2014].
- [50] A. Sprunt, A Three Axis CNC Router Design, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [51] Ubuntero, “Gravando vídeos do seu desktop no Ubuntu,” 2011. [Online]. Available: <http://www.ubuntero.com.br/2011/04/gravando-videos-do-seu-desktop-no-ubuntu>. [Acesso em 11 June 2014].
- [52] hrqmuniz, “LinuxCNC Simulation Using Ubuntu 10.04,” 2014. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=zFCuNz2SCk0&feature=youtu.be>. [Acesso em 22 June 2014].
- [53] F. L. Palhares e R. S. Crepaldi, Proposta de Procedimento de Projeto Estrutural Racional para Embarcações de Planeio, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.
- [54] SM - Computação Gráfica, “Usinagem CNC,” [Online]. Available:

- <http://www.treinamentoprofissional.com/usinagem2-02.html>. [Acesso em 6 9 2014].
- [55] Kastro Soluções, Manual Rápido - Servo Minas A5 LIQI - Ligação e Parametrização, 2014.
- [56] *CATIA V5 How to import IGS surfaces into V5 then Thicken*. [Filme]. m1turbo, 2011.

7. ANEXOS

7.1. DESENHOS DE CONJUNTO E FABRICAÇÃO

Abaixo estão primeiramente os desenhos ajustados e em seguida os desenhos feitos na primeira fase do projeto, retirados de [2].

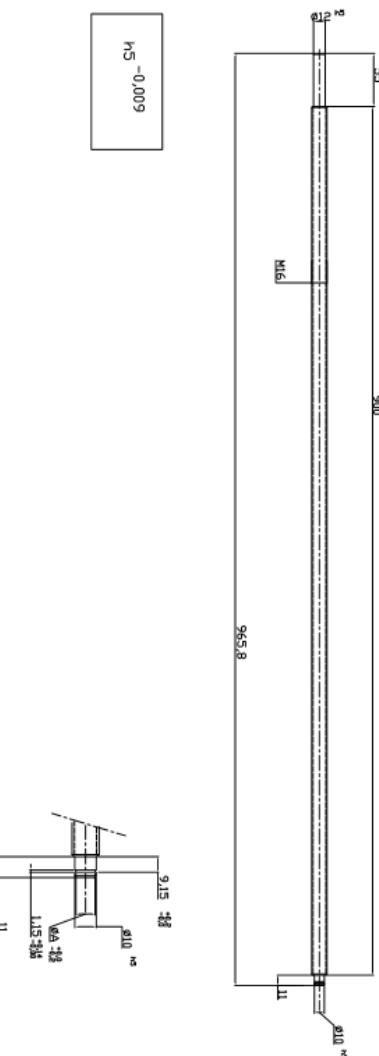


CASO 2

2

Flange apontada para o mancal de apoio (cota de diâmetro 10)

HENRIQUE MINIZ DE SOUZA	
DATA:	REVISADO: 00
ASSINADO:	APROVADO: 00
DATA:	02/10/2011
TIPO:	WELDING
PROJETO:	SAE 1020
PROJETO:	00
PROJETO:	00
PROJETO:	00
FUSO:	2014-10-henrique
PROJETO:	2
PROJETO:	1

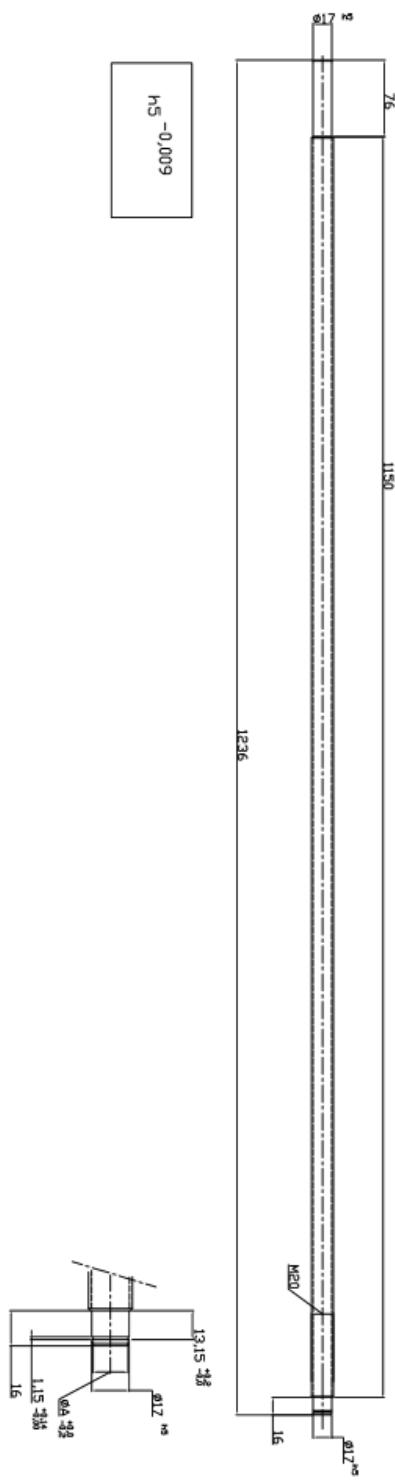


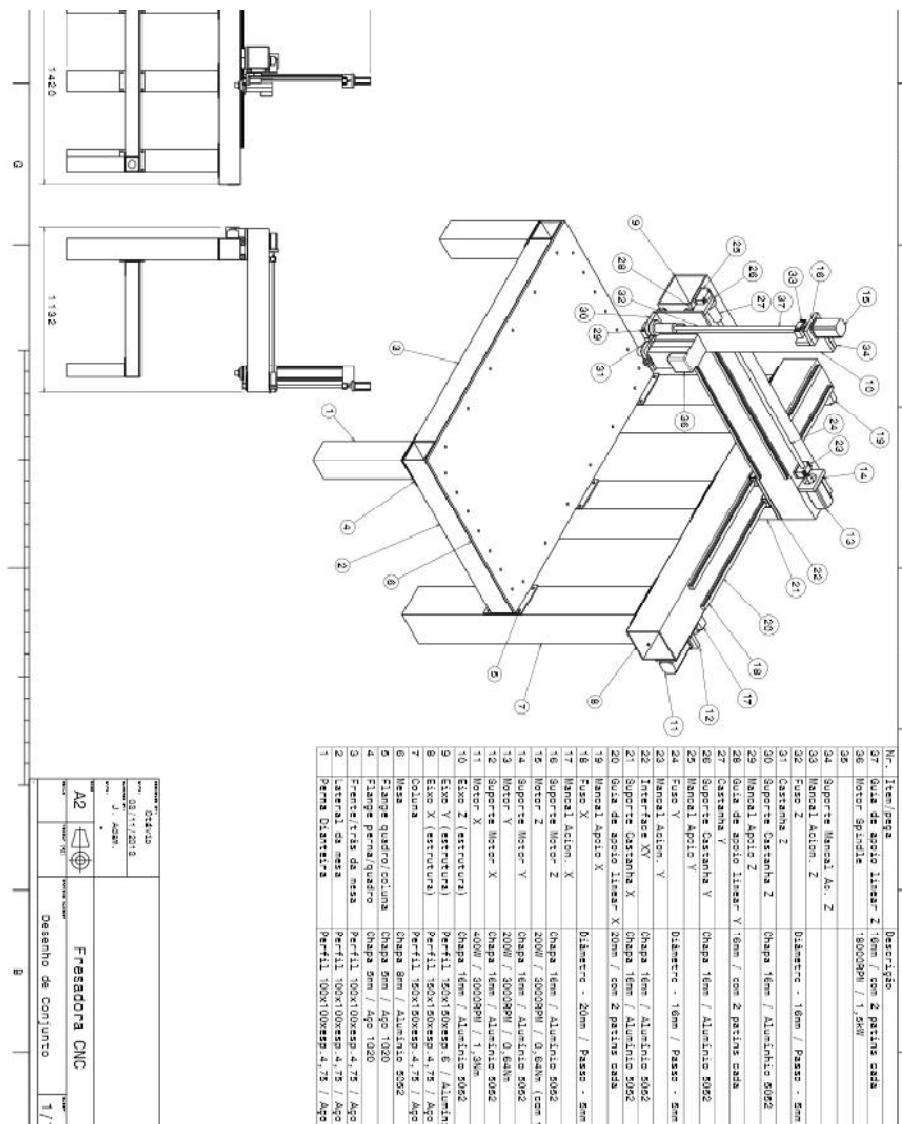
CASO 2

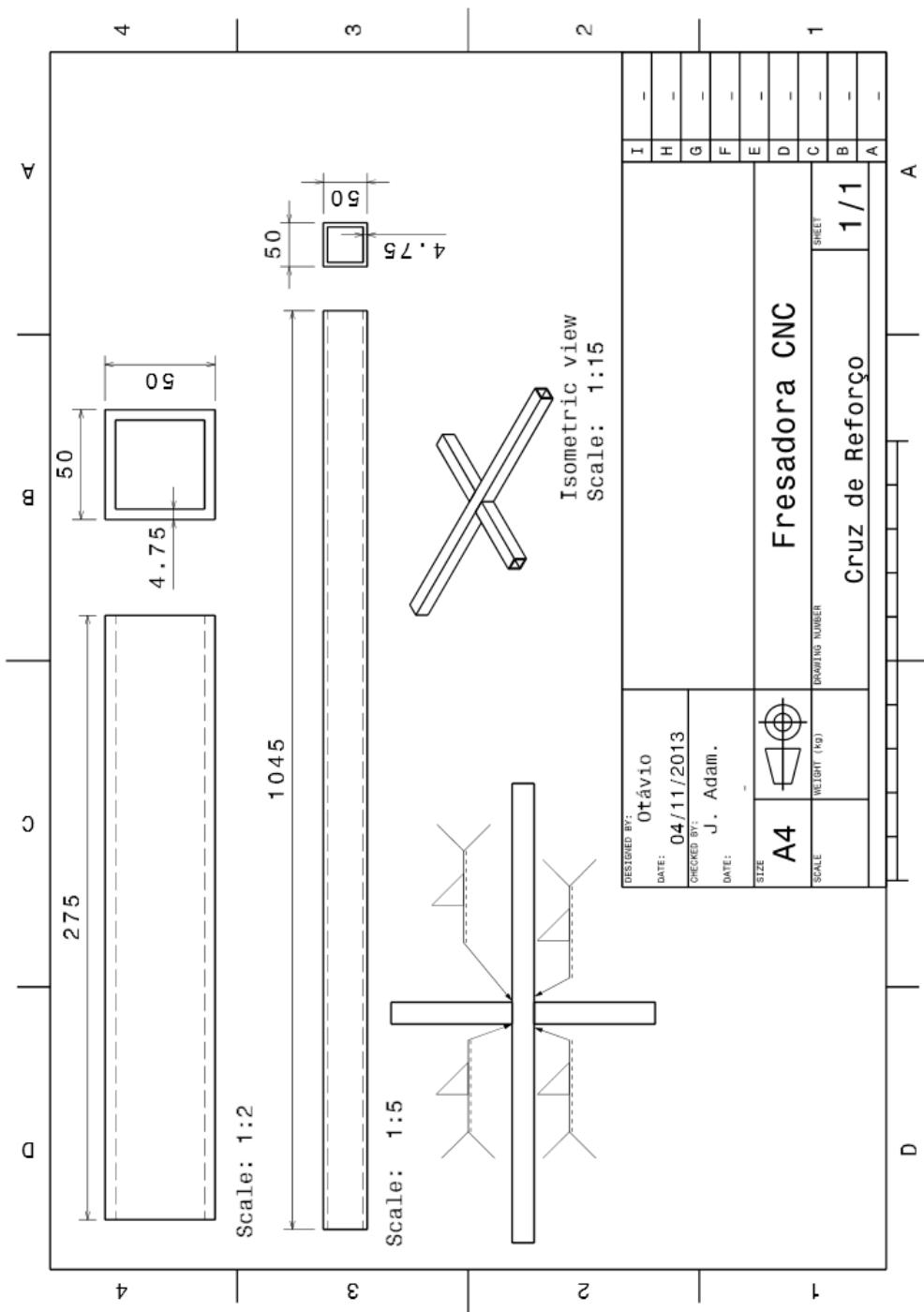
1

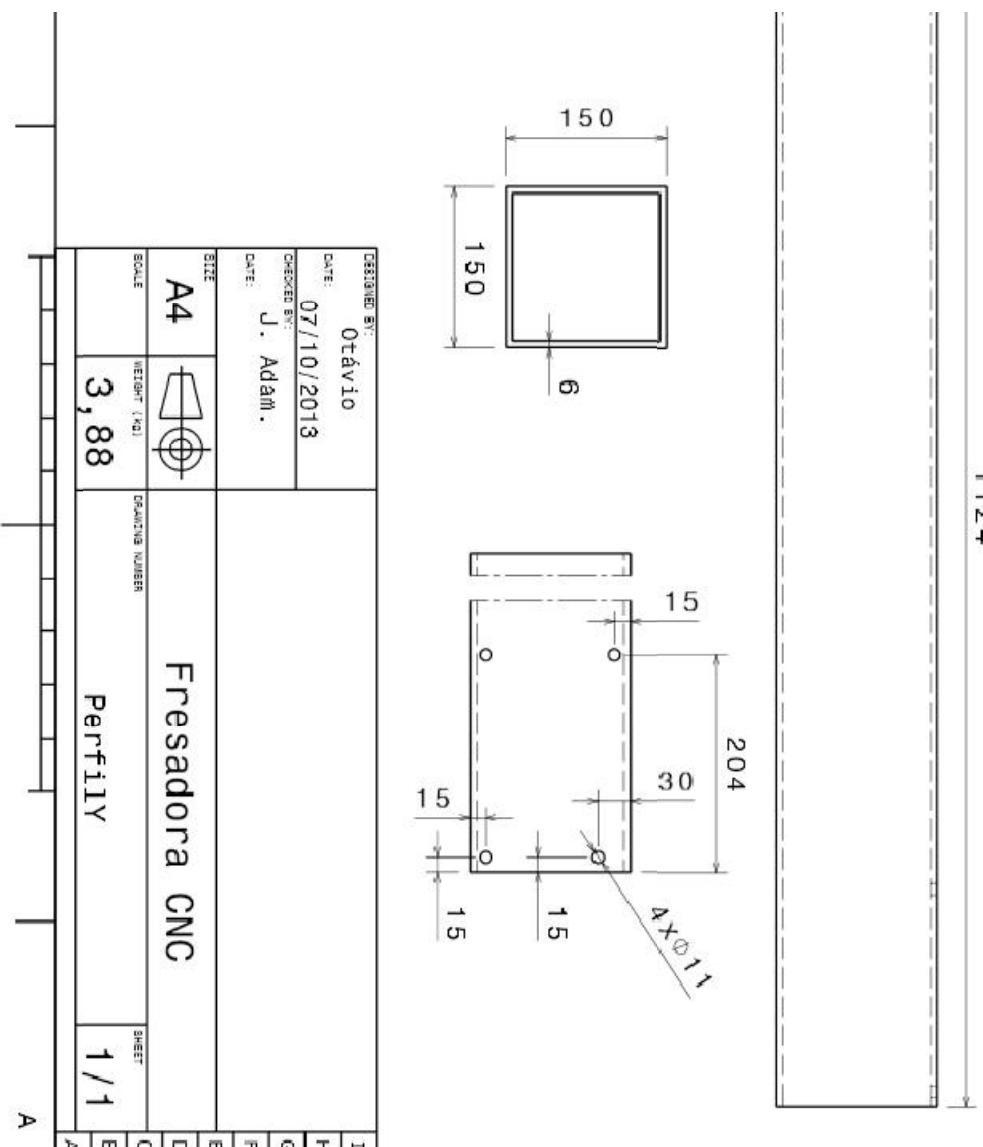
HENRIQUE MUNIZ DE SOUZA	
DATA:	REVISADO: 00
APROVADO:	APROVADO:
DATA: 24/10/2014	
BRAKE:	MATERIAL: SAE 1020
TESTAMENTO:	PROJETO: 00
TOPOGRAFICO:	ESCALA: 1:1
FUSO:	RESPEITE: 1 PERM: 1
2014-10-Henrique	versão: 1

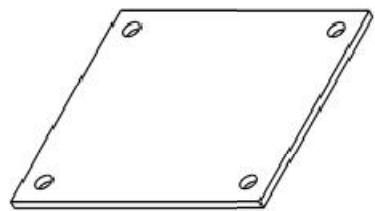
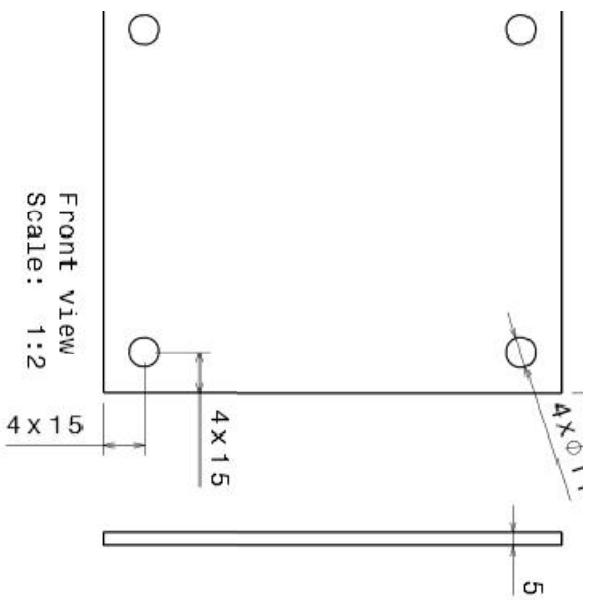
Flange apontada para o mancal de acionamento (cota de diâmetro 16)





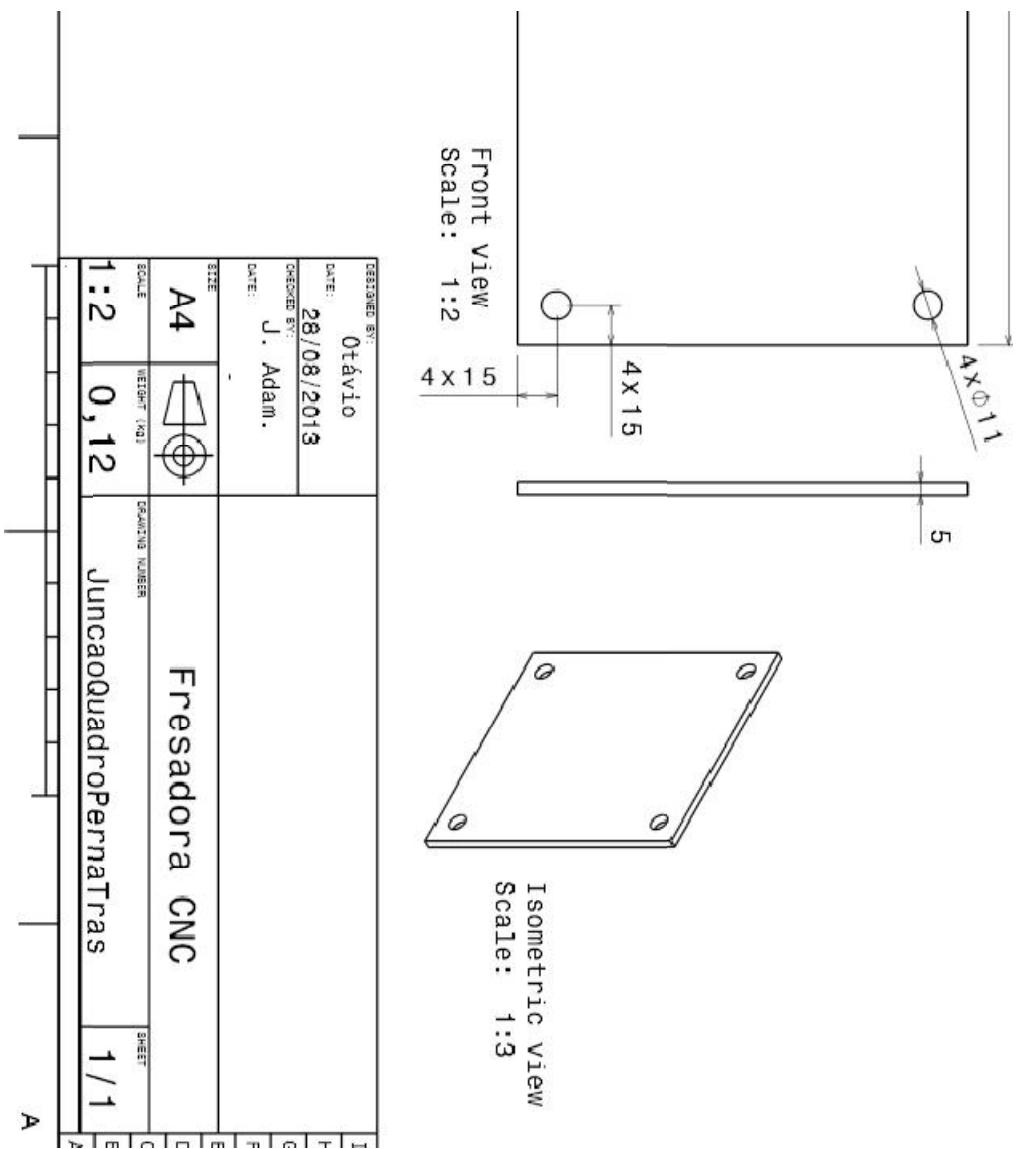


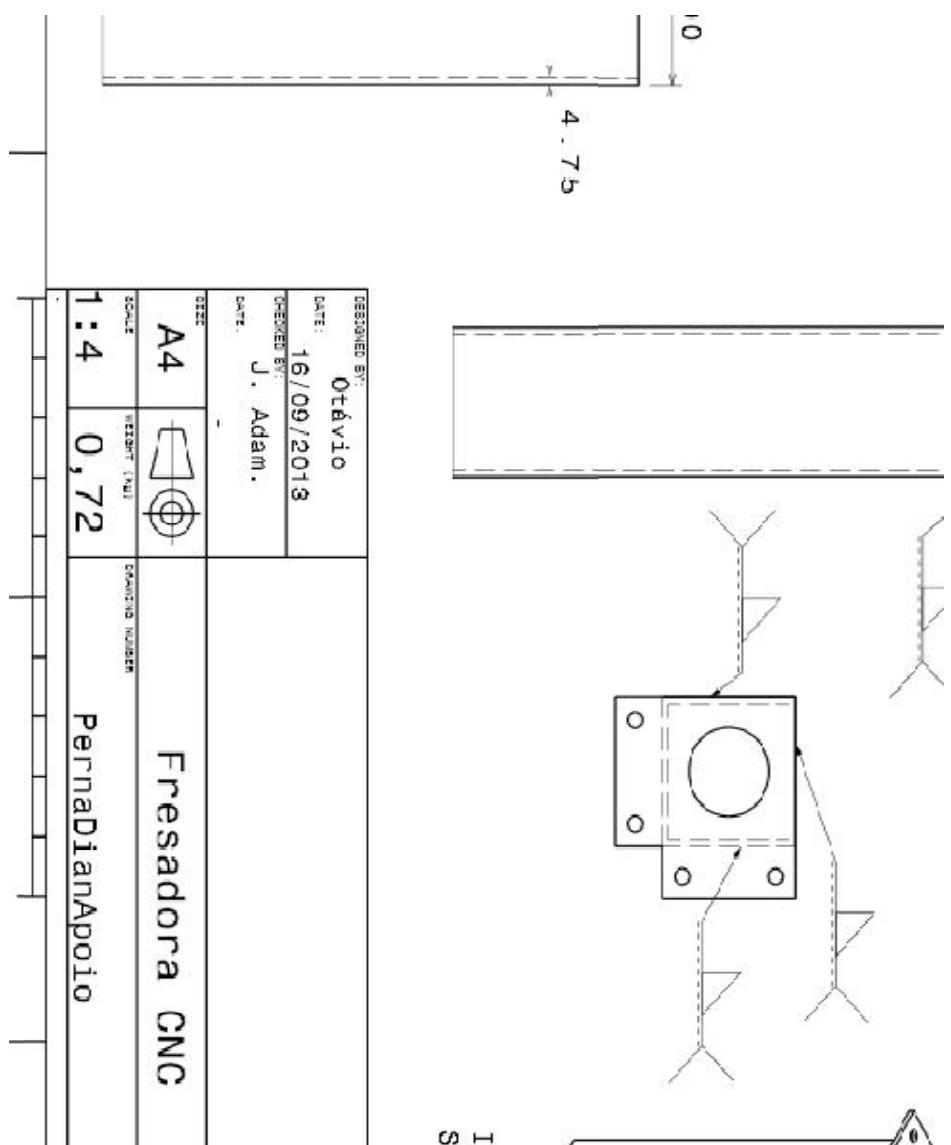




DESIGNED BY:	Otávio
DATE:	28/08/2013
CHECKED BY:	J. Adam.
DATE:	
SIZE	A4
SCALE	1:2
WEIGHT (kg)	0,12
DRAWING NUMBER	JuncaoQuadroPernaTras
SHEET	1 / 1

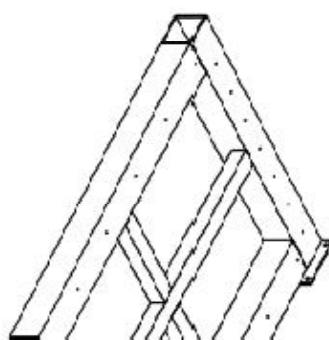
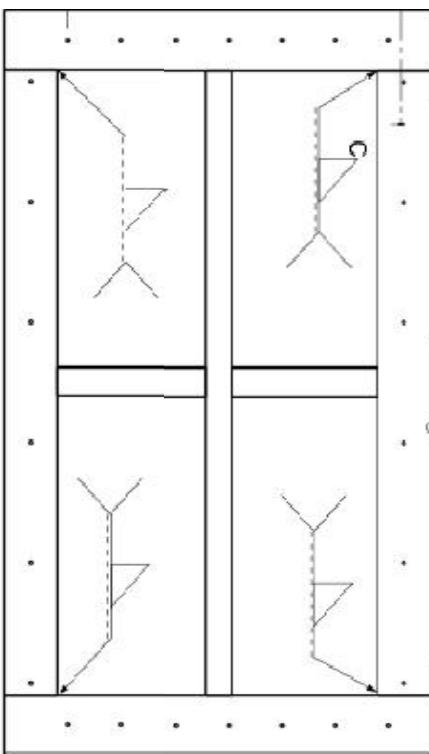
A







Section v
Scale: 1



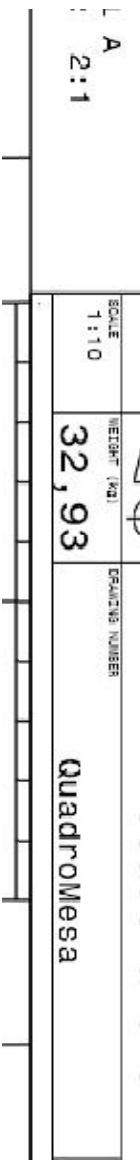
Solda retilha nos três lados dos tubos e chapas exceto o superior

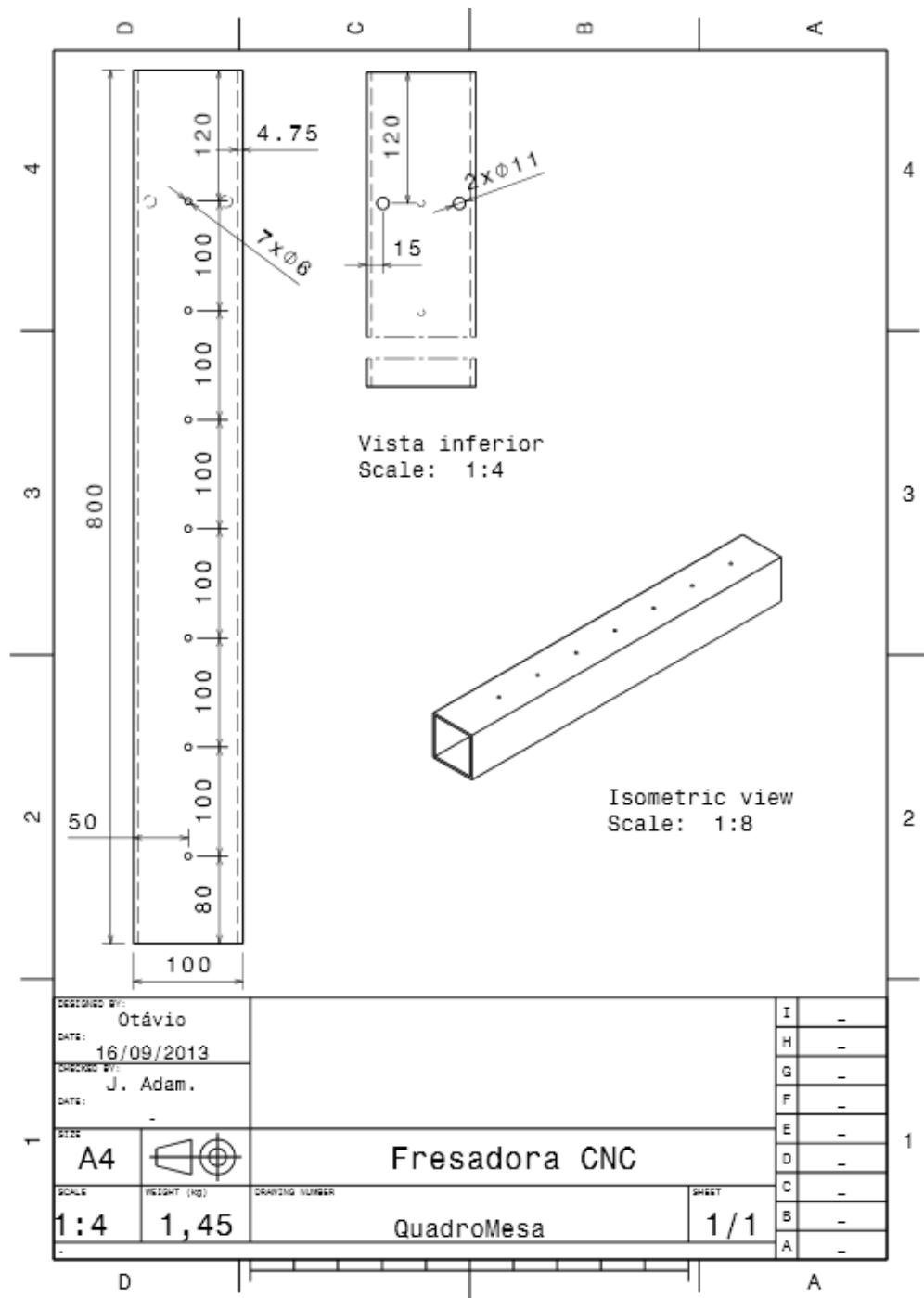
desenhado por:
Otávio
data:
28/08/2013

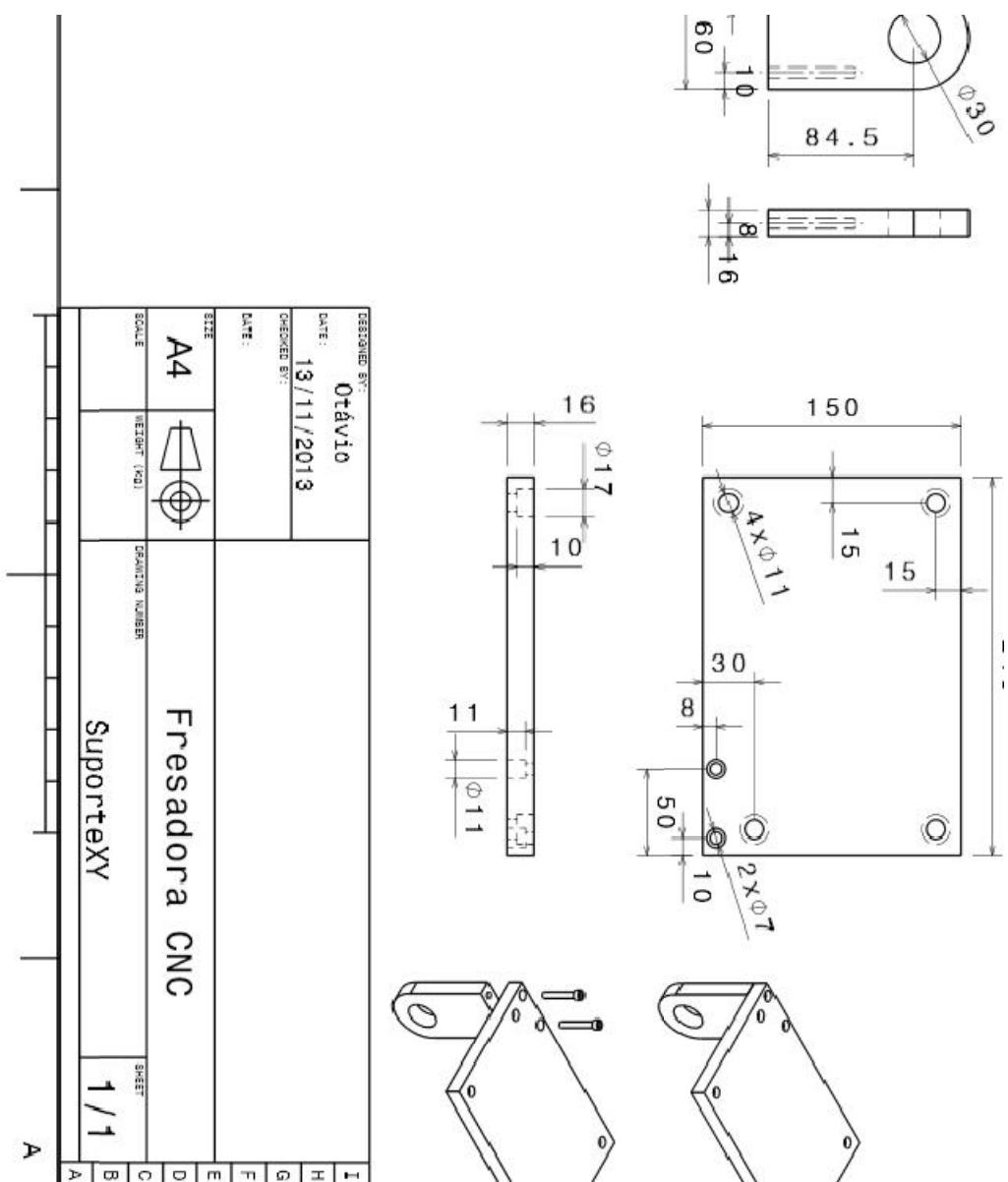
desenhado por:
J. Adam.
data:

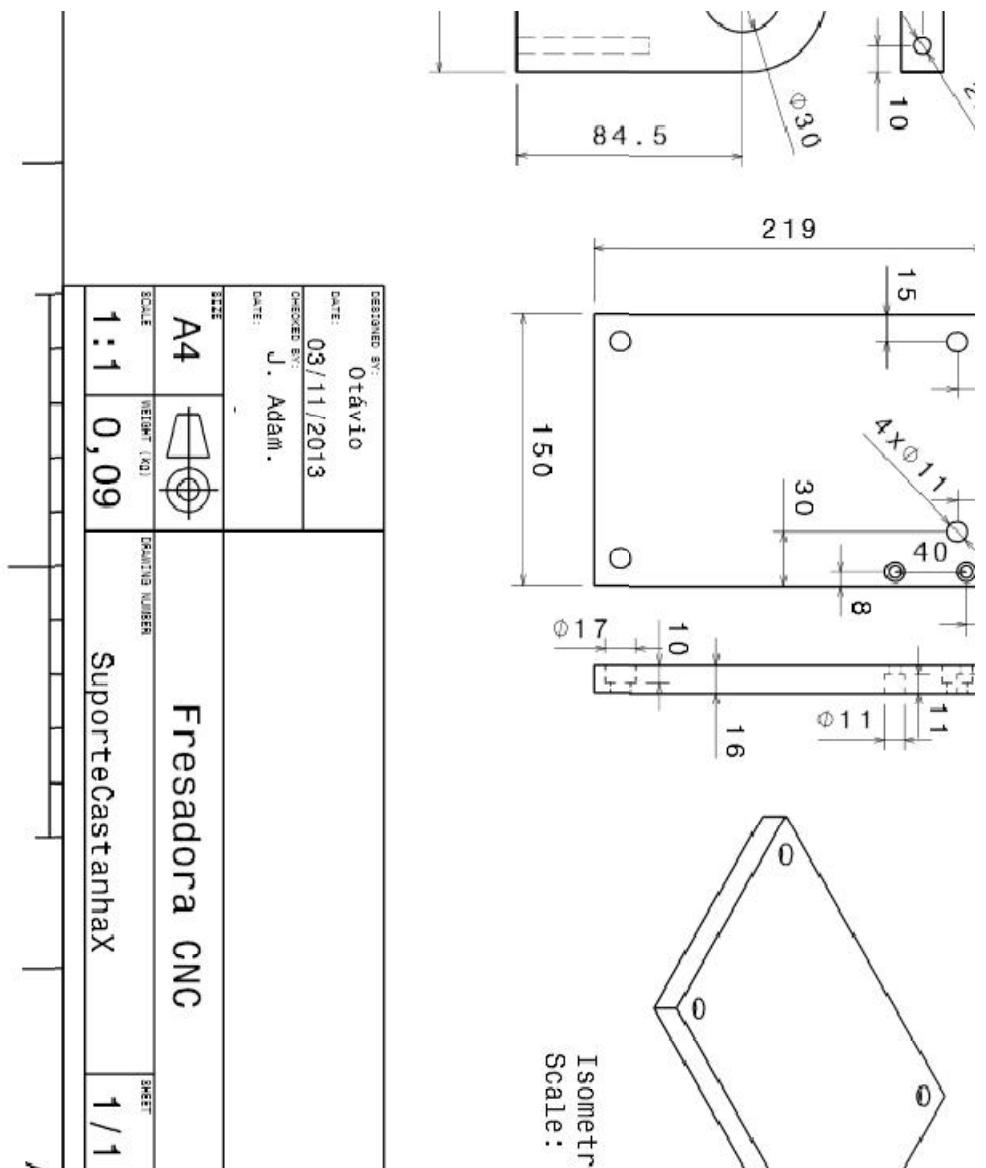
Fresadora CNC

A4		WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER
1:10	32,93		QuadroMesa









Front view
Scale: 1:2

Left view
Scale: 1:2

Isometric view
Scale: 1:2

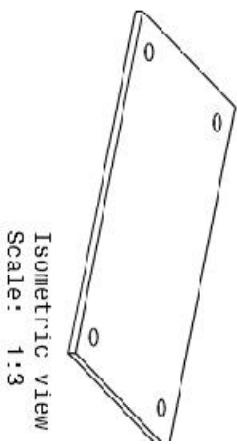
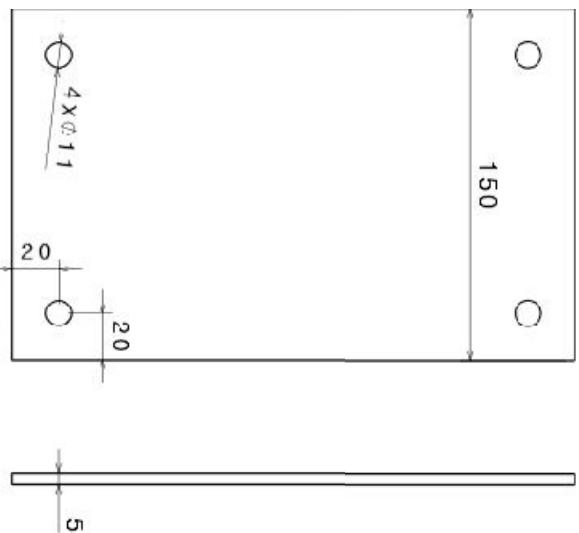
DESIGNED BY:	D. Davi 10
DATE:	03/09/2013
CHECKED BY:	J. Adam.
DATE:	-
SIZE:	A4
SCALE:	1:2
NOTES (NQ)	ROUTING NUMBERS
Fresadora CNC	
SHEET	1 / 1
A	B
C	D
E	F
G	H
I	J
K	L
M	N
O	P
Q	R
S	T
U	V
W	X
Y	Z

D

C

B

A



DESIGNED BY:	Olávio	T
DATE:	03/09/2013	H
DESIGNED BY:		G
DATE:	J. Adam.	F
SIZE:	A4	D
SCALE:	1:2	E
DESIGNER:	Oscar Pernatta	C
SCALE:	0,16	B
DESIGNER:	JuncaoPernaTrasX	A
SCALE:	1 / 1	

