

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

VINICIUS GHELLERE SBARDELOTTO

**PROJETO, FABRICAÇÃO E INTEGRAÇÃO DE EIXO ROTATIVO EM
FRESADORA CNC CONTROLADA PELO LINUXCNC**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2017.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

VINICIUS GHELLERE SBARDELOTTO

**PROJETO, FABRICAÇÃO E INTEGRAÇÃO DE EIXO ROTATIVO EM
FRESADORA CNC CONTROLADA PELO LINUXCNC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. M. Cassiano Bonin
Coorientador: Prof. M. Felício José Gesser

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2017.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Sbardelotto, Vinicius Ghellere
PROJETO, FABRICAÇÃO E INTEGRAÇÃO DE EIXO ROTATIVO
EM FRESADORA CNC CONTROLADA PELO LINUXCNC / Vinicius Ghellere
Sbardelotto ; orientação de Cassiano Bonin; coorientação
de Felício José Gesser. - Florianópolis,
SC, 2018.

78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Mecatrônica. 2. Fresadora. 3. SprutCAM. 4. LinuxCNC.
5. Eixo Rotativo. I. Bonin, Cassiano. II. Gesser,
Felício José. III. Instituto Federal de Santa Catarina.
Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. IV.
Título.

PROJETO, FABRICAÇÃO E INTEGRAÇÃO DE EIXO ROTATIVO EM FRESADORA CNC CONTROLADA PELO LINUXCNC

VINICIUS GHELLERE SBARDELOTTO

Esse trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de dezembro, 2017.

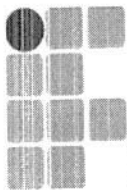
Banca Examinadora:

Cassiano Bonin, Mestre em Mecatrônica

Felício José Gesser, Mestre em Mecatrônica

Aurélio da Costa Sabino Netto, Doutor em Engenharia Mecânica

Marcelo Vandresen, Doutor em Engenharia Mecânica



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **Vinicius Ghellere Sbardelotto**, matrícula n° 131004334-5, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **INTEGRAÇÃO DE MESA ROTATIVA EM FRESADORA CNC CONTROLADA PELO LINUXCNC**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis.

Florianópolis, 15 de dezembro de 2017.

Cassiano Bonin

Prof. Orientador do TCC: Cassiano Bonin

AGRADECIMENTOS

À minha noiva, Schaiana, por sempre acreditar em mim e por todo o apoio, principalmente nos momentos mais difíceis dessa jornada, sempre me ajudando e me incentivando.

À minha família pelo amor e apoio em todas as minhas decisões e pelo incentivo que recebi desde que comecei a desmontar meus brinquedos, ao invés de brincar com eles.

Aos meus orientadores, Felício e Cassiano, por toda atenção, conhecimento passado e dedicação durante esse trabalho.

Aos meus colegas de classe, Gabrielli, Kisa, Marcos, Max e Michel, por todo companheirismo e as risadas compartilhadas durante esses cinco anos.

“Nada é difícil, se for dividido em pequenas partes.”

Henry Ford

RESUMO

Máquinas de usinagem que utilizam CNC (Comando Numérico Computadorizado) são necessárias para realizar a usinagem de peças complexas como, por exemplo, pás de hélices e fusos; quanto maior a complexidade da peça desejada, maior é o número de eixos de movimentação que uma máquina CNC precisa para produzi-la. Atualmente, o IFSC (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina) conta somente com fresadoras CNC de três eixos, que têm a produção limitada a peças mais simples; diante disso, este trabalho propôs a implementação de um eixo adicional, do tipo rotativo, para a fresadora CNC Denford TRIAC PC, disponível no LAM (Laboratório de Automação da Manufatura) do IFSC – Câmpus Florianópolis. Existem no mercado opções de eixos adicionais para fresadoras CNC prontos, porém, como o custo desses módulos é elevado, a proposta desse trabalho foi desenvolver um eixo adicional com recursos da própria instituição, já que, além do ferramental e material, a mesma possui conhecimento técnico para o desenvolvimento da solução. Após a definição do tema, uma versão adaptada do modelo PRODIP (Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos) foi utilizada como metodologia para o desenvolvimento do módulo. Para isso, foram realizadas as seguintes pesquisas: qualitativa do tipo exploratório, aplicada e bibliográfica, cujo referencial teórico teve apoio em bases de dados e sites indexados. Durante o desenvolvimento do trabalho, foram escolhidos os componentes mecânicos, eletromecânicos e de acionamento, além da configuração do módulo adicional no controlador LinuxCNC. Após a implementação do novo módulo, a programação e a simulação de usinagem da peça foram feitas com o auxílio do *software* SprutCAM, que permite virtualizar a máquina real. O programa gerado garantiu que a usinagem ocorresse de forma esperada, resultando na peça desejada: um fuso injetor. Foram realizadas análises metrológicas do fuso injetor fabricado, mostrando que o resultado foi condizente com o esperado, validando o propósito do trabalho.

Palavras-chave: Mecatrônica. Eixo Rotativo. CNC. Fresadora. Usinagem.

ABSTRACT

Machining machines using CNC (Numerical Computerized Command) are necessary to perform the machining of complex parts, for instance, propeller blades and injector molding screws; the greater the complexity of the desired part, the greater the number of driven axis that a CNC machine needs to manufacture it. Currently, IFSC (Federal Institute of Education, Science and Technology of Santa Catarina) relies only on three-axis CNC milling machines, which limits parts manufacturing to simpler parts; having this limitation in mind, this work proposes the implementation of an additional rotary type axis for the CNC Denford TRIAC PC milling machine, available at the Automation Laboratory of IFSC - Câmpus Florianópolis. There are options of, ready to use, 4th axis modules available for purchase in the market, however, as the cost of these modules is high, the purpose of this work was to develop an additional axis in the institution itself, as it has all the necessary tools, materials and technical knowledge needed. With the project's theme defined, an adapted version of the PRODIP (Integrated Product Development Process) model was used as a methodology for the development of the module; For this, the following researches were carried out: qualitative of the exploratory, applied and bibliographic type, whose theoretical reference was supported in databases and indexed sites. During the development phase, mechanical, electro-mechanical and driving mechanisms were chosen and the rotary module was configured in the LinuxCNC controller. After the implementation of the new module, the programming and simulation of part machining was done with SprutCAM software, which allows the virtualization of the actual machine; the machining program generated by SprutCAM guaranteed that the milling happened according to plan, having as result the desired part: an injection molding screw. Metrological analysis of the manufactured part was made, showing that the results were as expected, validating the work done in this project.

Keywords: Mechatronics. Rotating Axis. CNC. Milling Machine. Machining.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	11
1.2	JUSTIFICATIVA	11
1.3	OBJETIVO GERAL	12
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	MÁQUINAS CNC	13
2.2	MÓDULOS DE EIXO ROTATIVO EM MÁQUINAS CNC	13
2.3	REDUTORES DE VELOCIDADE: CICLOIDAL E COROA E “SEM FIM”	16
2.4	SENSORES PARA DEFINIÇÃO DA REFERÊNCIA ZERO MÁQUINA: CONTATO MECÂNICO E INDUTIVO	19
2.5	CONJUNTOS DE ACIONAMENTO: SERVOMOTOR E MOTOR DE PASSO	20
2.6	CONTROLADOR CNC LINUXCNC	21
2.7	SPRUTCAM	22
3	METODOLOGIA	24
3.1	MÉTODOS APLICADOS	25
4	PLANEJAMENTO E PROJETO	26
4.1	PLANEJAMENTO DO PRODUTO	26
4.2	PLANEJAMENTO DO PROJETO	26
4.3	PROJETO INFORMACIONAL	27
4.4	PROJETO CONCEITUAL	29
4.5	PROJETO PRELIMINAR	32
4.5.1	Projeto Mecânico	32
4.5.2	Projeto Eletroeletrônico	38
4.5.3	Parametrização do servo driver	41
4.5.4	Configuração do LinuxCNC	43
4.5.5	Virtualização da máquina no SprutCAM	46
4.6	PROJETO DETALHADO	49
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	50
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICES	60
	APÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO DO REDUTOR CICLOIDAL	61

APÊNDICE B - DESENHO TÉCNICO DO SERVO MOTOR	62
APÊNDICE C - DESENHO TÉCNICO DO CONE PORTA PINÇA	63
APÊNDICE D - DESENHO TÉCNICO DA FRESADORA DENFORD TRIAC PC	64
APÊNDICE E - DESENHO TÉCNICO DO DISCO DE INTERFACE	65
APÊNDICE F - DESENHO TÉCNICO DA HASTE DE FIXAÇÃO DO SERVO MOTOR	66
APÊNDICE G - DESENHO TÉCNICO DO BLOCO DE FIXAÇÃO DO MÓDULO....	67
APÊNDICE H - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .INI PARTE 1 .	68
APÊNDICE I - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .INI PARTE 2 ...	69
APÊNDICE J - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 1	70
APÊNDICE K - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 2	71
APÊNDICE L - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 3	72
APÊNDICE M - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 4	73
APÊNDICE N - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 5	74
APÊNDICE O - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 6	75
ANEXO	76
ANEXO A - DIAGRAMA DE CONEXÕES DO SERVO DRIVER PARA OPERAÇÃO EM MODO DE CONTROLE DE POSIÇÃO	77

1 INTRODUÇÃO

A usinagem está presente em diversas indústrias, como a automotiva, a aeroespacial e a de eletrodomésticos. Para a usinagem de peças complexas, são utilizadas máquinas que fazem uso de CNC (Comando Numérico Computadorizado) que, segundo o “Guia de CNC para iniciantes”, elaborado pela empresa Protoptimus (2017), possibilita o controle simultâneo dos vários eixos de uma máquina, utilizando uma lista de movimentos escrita em código de programação. Quanto maior a complexidade da peça desejada, maior é o número de eixos de movimentação que uma máquina CNC precisa para produzi-la.

Um tipo de máquina que utiliza CNC é a máquina fresadora.

A operação de fresamento é reconhecida pela versatilidade na produção de geometrias diversas, além de garantir elevadas taxas de remoção de material, visto que a ferramenta (fresa) possui múltiplas arestas de corte. Nesse grupo de operações, a ferramenta gira enquanto a peça, presa à mesa, é responsável pelos movimentos (FERRARESI; RUFFINO; PALLEROSI, 1974).

Existem fresadoras de diversos números de eixos. Atualmente, o IFSC conta somente com fresadoras CNC de três eixos, que não são suficientes para a usinagem de peças de alto grau de complexidade. Algumas máquinas fresadoras são modulares, ou seja, eixos adicionais podem ser agregados a elas; diante disso, este trabalho propõe o projeto, a fabricação e a integração de um eixo adicional, do tipo rotativo, para a fresadora CNC Denford TRIAC PC, disponível no LAM (Laboratório de Automação da Manufatura) do IFSC – Câmpus Florianópolis. Com a adição do eixo rotativo, será possível realizar o tornofresamento que, segundo Fernández, Lacalle e Ugalde (2010), é o fresamento de uma peça, onde, na operação, é necessário girar tanto a peça como a ferramenta simultaneamente.

Para a realização do projeto, foram utilizadas as seguintes pesquisas: qualitativa do tipo exploratório, aplicada e bibliográfica, a fim de extrair todas as informações necessárias a respeito do tema abordado. A metodologia empregada foi uma adaptação do modelo PRODIP, que, segundo Back et al. (2008), possui três macrofases: planejamento do projeto, elaboração do projeto do produto e

implementação do lote piloto. A partir dessa metodologia, foi possível estabelecer um plano de trabalho conciso, que foi indispensável para a execução da ideia proposta.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Para a usinagem de peças de alto grau de complexidade em máquinas fresadoras CNC, é necessário haver uma estrutura de quatro módulos ou mais, para garantir uma melhor movimentação da peça, permitindo a manipulação do material em lugares em que a fresadora de três eixos, ou menos, não seria capaz de atingir.

O IFSC – Câmpus Florianópolis possui apenas máquinas CNC de até três eixos, o que impossibilita a fabricação destas peças mais complexas, que poderiam alavancar diversas pesquisas científicas no câmpus.

Como o custo de um módulo adicional rotativo é elevado, a solução mais adequada para a instituição seria a sua fabricação, utilizando materiais já disponíveis no câmpus. Com base no exposto, esta pesquisa questiona se seria viável a implementação de um quarto eixo (do tipo rotativo), de baixo custo, para a fresadora CNC Denford TRIAC PC, disponível no IFSC – Câmpus Florianópolis, que conceda maior grau de liberdade para a máquina, permitindo a usinagem de peças complexas?

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, no IFSC – Câmpus Florianópolis, há somente máquinas fresadoras CNC de até três eixos, o que limita a produção de inúmeros tipos de peças mais elaboradas. Devido à impossibilidade de fabricação destas peças, algumas pesquisas científicas do câmpus ficam restritas a alternativas mais simplistas, que diminuem os seus potenciais. Com a adição do quarto eixo, vários outros tipos de peças poderão ser fabricados na própria instituição, o que possibilita a redução de gastos e o suprimento dos grupos de pesquisas, tornando o câmpus mais autossuficiente e mais tecnológico, influenciando os profissionais em formação. Outro aspecto que justifica o desenvolvimento deste trabalho é o conhecimento adquirido no processo, que é de grande importância para a formação do pesquisador.

1.3 OBJETIVO GERAL

Implementar um quarto eixo (do tipo rotativo), de baixo custo, para a máquina fresadora CNC Denford TRIAC PC, disponível no IFSC – Câmpus Florianópolis, a fim conceder um maior grau de liberdade para a máquina, para que seja possível a usinagem de peças complexas.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar o projeto técnico do módulo do quarto eixo, a fim de obter todo o conhecimento e especificações técnicas necessárias para a fabricá-lo;
- b) Fabricar o módulo do quarto eixo;
- c) Fazer a integração mecatrônica do módulo à fresadora Denford TRIAC PC;
- d) Configurar o quarto eixo no LinuxCNC;
- e) Virtualizar a fresadora no *software* SprutCAM, para a programação e simulação do quarto eixo;
- f) Testar o desempenho do protótipo na usinagem de um fuso injetor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados os temas necessários para o desenvolvimento de um módulo rotativo para fresadoras CNC, como o que é uma máquina CNC, eixo rotativo em máquinas CNC, redutores de velocidade, sensores para definição da referência zero máquina, conjuntos de acionamento, controladores LinuxCNC e sobre o *software* de programação, simulação e virtualização CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing) SprutCAM. Esses temas foram explicados em subtópicos ao longo da Fundamentação Teórica.

2.1 MÁQUINAS CNC

De acordo com Celani (2007, p.06):

As máquinas CNC (Computer Numeric Control) são equipamentos que permitem a usinagem automática de peças em diferentes tipos de materiais, por meio do controle simultâneo de diversos eixos, através de uma lista de movimentos escrita em código de máquina, que é enviada a partir de um computador. Essas máquinas permitem a produção de peças complexas com grande precisão, a partir da modelagem geométrica em programas de CAD/CAM.

Segundo Volpato (2007), fresadoras, curvadoras de placas e tubos metálicos, cortadoras a plasma, cortadoras a jato de água, máquinas de eletro-erosão e cortadoras do tipo oxicorte são exemplos de máquinas controladas por computador.

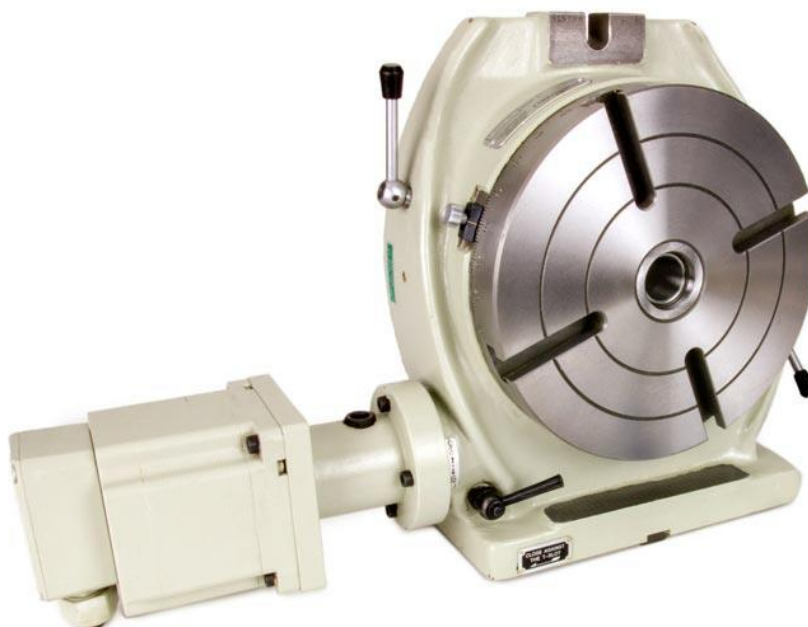
2.2 MÓDULOS DE EIXO ROTATIVO EM MÁQUINAS CNC

O que define o número de eixos de uma máquina-ferramenta é o número de movimentos independentes que ela pode comandar (BOHEZ, 2002). Na usinagem, utilizando cinco eixos simultâneos, há a remoção de material por meio de movimentos coordenados entre os cinco eixos da máquina-ferramenta; devido ao número de eixos, a orientação da ferramenta em relação à peça pode mudar constantemente, o que permite uma maior mobilidade em superfícies complexas e com inclinações negativas. Em cenários como o citado anteriormente, onde há necessidade de uma maior mobilidade e uso de variadas inclinações da ferramenta em relação à peça, não seria possível utilizar uma máquina-ferramenta de somente três eixos, por exemplo, pois a

exigência de vários reposicionamentos da peça geraria problemas, como maior imprecisão do produto final, custos com sistemas de fixação e processo com maior dependência do operador da máquina (DONG; VICKERS; WANG, 2007).

Existem diversos fabricantes que fornecem soluções prontas de eixos rotativos para serem integrados a máquinas-ferramentas CNC. A Figura 1 mostra um módulo de eixo rotativo do fabricante Tormach, que utiliza o princípio de redução de coroa e “sem fim” (esse tipo de redutor será explicado na próxima seção deste documento).

Figura 1 - Módulo de quarto eixo Tormach.



Fonte: TORMACH (2017).

Já a Figura 2 mostra um eixo rotativo do fabricante Coronex, que utiliza redutor cicloidal, o qual também será tratado na próxima seção.

Figura 2 - Módulo de quarto eixo Coronex.



Fonte: Coronex (2017).

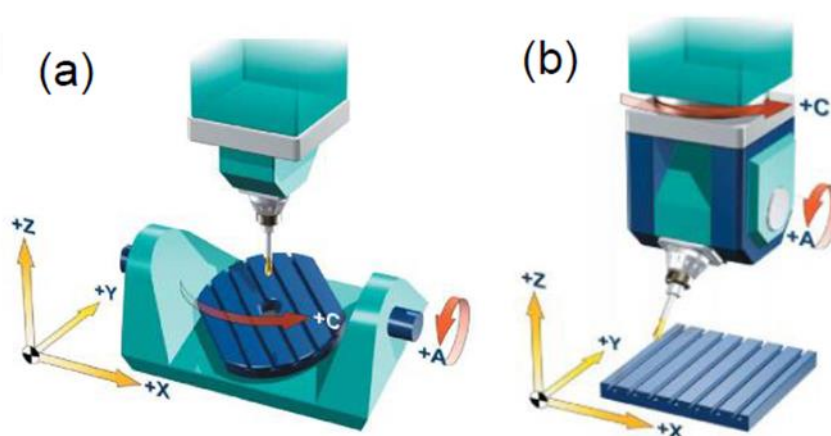
Máquinas-ferramentas de múltiplos eixos podem trabalhar com o eixo rotativo em modo posicional (indexador) ou interpolado. No modo posicional, o eixo rotativo é utilizado apenas para orientar a peça ou ferramenta e a usinagem é feita pelo movimento coordenado dos eixos lineares. No modo interpolado, todos os eixos são interpolados simultaneamente, usinando a peça com o movimento coordenado de todos os eixos (APRO, 2008).

Em relação à configuração cinemática de máquinas-ferramentas de cinco eixos, que consiste na forma com que a disposição dos eixos é dada, há duas configurações mais comuns, que estão ilustradas na ; na parte (a), é ilustrada a máquina com mesa rotativa basculante, que apresenta grande flexibilidade e baixo custo, pois reduz a complexidade do eixo-árvore¹; na parte (b) é ilustrada a configuração de cabeçote birrotativo², que é mais comum em usinagens de médio e grande porte, onde a inclinação e rotação do cabeçote são mais viáveis (APRO, 2008).

¹ Eixo que aciona a ferramenta de usinagem.

² Cabeçote da ferramenta com dois eixos rotativos.

Figura 3 - Configurações cinemáticas de máquinas cinco eixos com mesa rotativa basculante em (a), com cabeçote birrotativo em (b)



Fonte: SIEMENS AG (2004).

Máquinas CNC utilizam o conceito de zero máquina, que é a origem do sistema de coordenadas da máquina e o ponto de início para todos os outros sistemas de coordenadas e pontos de referências. Toda vez que a máquina é ligada, uma sequência é realizada para definição do zero máquina; essa sequência é geralmente chamada de sequência de *home*. Na sequência de *home*, é realizada uma técnica de “zeramento” do eixo, onde cada eixo se move para uma determinada direção, até acionar o seu respectivo sensor de referência. Tal posição onde ocorre o acionamento do sensor é considerada a posição zero para o eixo. Sensores utilizados para definir o zero máquina são normalmente chamados de sensores de *home* (TAVARES, 2009).

2.3 REDUTORES DE VELOCIDADE: CICLOIDAL E COROA E “SEM FIM”

Segundo Telmac (2017), um redutor de velocidade é um mecanismo utilizado para reduzir a velocidade de um eixo de entrada, a fim de aumentar o torque de um eixo de saída. Segundo Nam e Oh (2011), algumas das características importantes a serem consideradas sobre redutores de velocidade são:

- a) A razão de redução de velocidade, que vai depender da velocidade máxima desejada para a aplicação e da velocidade máxima de rotação do motor que acionará o redutor;

- b) O tamanho do conjunto, para ocupar o menor espaço possível na máquina; a rigidez torcional, que deverá ser alta, para minimizar a torção sobre o redutor;
- c) O jogo angular, que precisa ser baixo, para garantir que movimentos indevidos não ocorram;
- d) O preço, priorizando o menor custo possível e o *backlash*, que é a folga em sistemas de transmissão causada pelo espaçamento entre os elementos do mecanismo.

Existem vários tipos de redutores de velocidade como, por exemplo, o redutor cicloidal e o redutor coroa e “sem fim”. O redutor cicloidal, exemplificado pela Figura 4, possui as seguintes características: elevada razão de redução, que é a velocidade de entrada sobre velocidade de saída, a qual varia de 9:1 até 87:1 no primeiro estágio e de 99:1 até 7569:1 no segundo estágio; alta eficiência de transmissão, sendo maior que 90% para o primeiro estágio; estrutura compacta, com pequeno tamanho e baixo peso; alta rigidez torcional; baixo jogo angular; facilidade de instalação, pelo fato de que o eixo de entrada é colinear ao eixo de saída; possui backlash nulo na maioria de suas implementações; preço elevado se comparado a outros tipos de redutores; sentido de rotação do eixo de saída é oposto ao do eixo de entrada (BRANCO, 2013).

Figura 4 - Redutor cicloidal.



Fonte: NABTESCO (2013).

Quatro componentes básicos compõem um redutor cicloidal, são eles: um eixo de entrada de alta velocidade, roletes, um disco cicloidal (Figura 5) e um eixo de

saída de baixa velocidade. O eixo de entrada está conectado a um elemento excêntrico, que induz o movimento de rotação excêntrica do disco cicloidal, o qual transmite o movimento para o eixo de saída (D'AMICO, 2011).

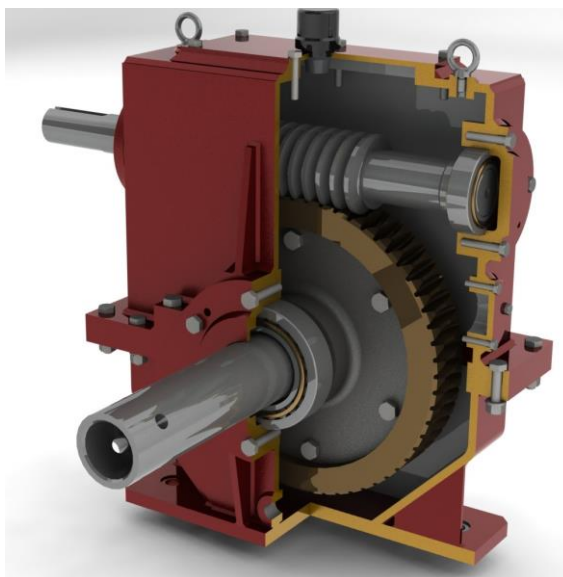
Figura 5 - Disco cicloidal.



Fonte: PRECISION TRANSMISSION CHAIN (2017).

O redutor coroa e “sem fim”, exemplificado pela Figura 6, tem baixo rendimento devido às perdas por atrito, possui grandes razões de redução, podendo chegar a 300:1 e possui preço bastante reduzido, se comparado ao redutor cicloidal. Existem vários tipos de mecanismos para diminuir ou anular o *backlash* em redutores coroa e “sem fim”; porém, conforme o desgaste dos componentes, é necessário fazer o reajuste do sistema *anti-backlash*, que é o sistema responsável por reduzir as “folgas” entre os componentes do redutor. Para este tipo de redutor, o eixo de entrada fica, geralmente, a 90° do eixo de saída (FILHO, 2017).

Figura 6 - Redutor coroa e “sem fim”.



Fonte: FRESADORA SANT'ANA (2017).

Segundo Gesser (2012), alguns métodos foram desenvolvidos pelos fabricantes de redutores coroa e “sem fim”, com o intuito de diminuir o *backlash* como, por exemplo, realizar o ajuste da distância entre centros, utilizando bucha excêntrica nos mancais do “sem fim”, dividir a coroa com mola de pré-carga, entre outros métodos.

2.4 SENSORES PARA DEFINIÇÃO DA REFERÊNCIA ZERO MÁQUINA: CONTATO MECÂNICO E INDUTIVO

Para realizar o procedimento de definição da referência de zero máquina, geralmente é utilizado um dos dois tipos de sensores: sensor de contato mecânico ou sensor indutivo. O sensor de contato mecânico é composto internamente por um ou mais contatos elétricos; a parte externa do sensor conta com uma haste que, quando acionada por um objeto atuador, fecha ou abre o contato elétrico. No caso do sensor indutivo, não há necessidade de contato físico entre o sensor e um corpo atuador. Internamente o sensor conta com um circuito elétrico que detecta alterações em um campo magnético, dessa forma, quando um objeto ferromagnético se aproxima do sensor, o campo eletromagnético é alterado e a saída do sensor é acionada (TERGOLINA, 2015).

2.5 CONJUNTOS DE ACIONAMENTO: SERVOMOTOR E MOTOR DE PASSO

Segundo Petruzella (2013), um motor elétrico é um dispositivo que funciona com corrente alternada ou contínua e que converte a energia elétrica em energia mecânica. Existem vários tipos de motores elétricos, como motor de passo e servomotor, que normalmente são utilizados em aplicações onde é necessário saber a posição do eixo do motor em relação ao sinal de comando.

A principal diferença entre um servomotor e os outros motores é que o servomotor trabalha junto a um controlador, que pode ser do tipo PID³, e a um encoder⁴. Um servomotor é um atuador rotativo que garante o controle, velocidade e precisão em aplicações de controle de posição em malha fechada⁵; outra característica é que o servo motor é projetado com pequeno diâmetro e longo comprimento do rotor, se diferenciando dos motores convencionais. O servomotor utiliza o *feedback*⁶ de posição do encoder para controlar a velocidade e a posição final do motor. Internamente, um servomotor combina um motor com um circuito de realimentação, um controlador e outros circuitos complementares. Servomotores têm excelente resposta à partida, parada e reversão de movimento (CITISYSTEMS, 2017).

Um motor de passo é um tipo de motor elétrico que é utilizado quando há a necessidade de algo ser rotacionado em um ângulo conhecido, requisito muito comum na indústria e nos dispositivos científicos em geral. O motor de passo possui um ímã muito forte em seu rotor e é controlado por uma série de campos eletromagnéticos, que são ativados e desativados eletronicamente; esses campos são produzidos por bobinas instaladas em torno do rotor. O controle computadorizado de motores de passo é uma das formas mais versáteis de sistemas de posicionamento. Cada vez que uma bobina é acionada, é gerado um campo eletromagnético o qual atrai o rotor, fazendo com que se movimente; esse movimento depende da distância entre cada bobina, a qual é dada em graus. (por exemplo, uma distância de 1,8° por

³ Segundo o site da Universidade de Michigan (2017), proporcional, integral, derivativo (PID) é uma técnica de controle de processos que une as ações derivativa, integral e proporcional, fazendo com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipativa pela ação derivativa. A técnica PID é utilizada por controladores eletrônicos.

⁴ É um dispositivo que fornece a posição angular do eixo do motor.

⁵ Tipo de controle que utiliza sensores ou transdutores para comparar o sinal de saída com o de referência, a fim de corrigir a variável controlada.

⁶ Sinal que é enviado pelo sensor para o controlador, para que sejam realizados os cálculos de controle.

passo, significa que, a cada vez que uma bobina for energizada, o motor irá girar 1,8°); dessa forma, ao serem acionadas sequencialmente as bobinas, pode-se alcançar o movimento desejado ou a posição desejada. Assim, para dar uma volta em um motor de 1,8°, por exemplo, são necessários 200 passos, pois 200 vezes 1,8° é igual a 360°. Quanto mais rápido for o comando de passos, mais rápido o motor gira (MECAWEB, 2017).

2.6 CONTROLADOR CNC LINUXCNC

O LinuxCNC é um controlador CNC desenvolvido para funcionar em um PC (Computador Pessoal) e com característica de código aberto, o qual pode ser implementado em computadores que operem no Sistema Operacional Linux com *kernel* de tempo real. O controlador conta com funcionalidades tão avançadas quanto as encontradas em outros controladores disponíveis no mercado (LINUXCNC, 2017).

Um ponto que se destaca no LinuxCNC é a implementação da Camada de Abstração de *Hardware* ou *Hardware Abstraction Layer* (HAL). O HAL é uma camada de *software* que faz a interface entre o *software* e os componentes físicos conectados ao CNC, o qual permite que módulos de *hardware* mais simples sejam interconectados para formar um sistema mais complexo. A grande vantagem do HAL é a sua habilidade de controlar módulos como se fossem caixas pretas, que podem ser modificadas ou substituídas, sem a necessidade de mudar ou reconfigurar todo o sistema. A flexibilidade do HAL simplifica bastante a interface do controlador com o *hardware* controlado e também dá suporte a vários tipos diferentes de cadeias cinemáticas, utilizadas em máquinas CNC. A configuração do HAL é feita em arquivo com a extensão .HAL, que é interpretado quando o LinuxCNC é executado, não sendo necessária a recompilação do *software* quando há alterações na configuração do HAL (HASCOET, 2016).

O LinuxCNC conta com um módulo que gerencia as entradas e saídas discretas, chamado de EMCIO (*Enhanced Machine Controller Input Output*). O objetivo do EMCIO é a integração de periféricos à máquina, periféricos como sistema de refrigeração, acionamento do eixo árvore, trocador de ferramentas e outras funções auxiliares (STAROVEŠKI et al., 2013).

Outro módulo do LinuxCNC é o EMCMOT (*Enhanced Machine Controller Motion*), que é o módulo executado em tempo real e em intervalos de tempo fixos; o EMCMOT tem a função de planejar trajetórias, efetuar cálculos de cinemática direta e inversa e executar cálculo dos valores de saída dos eixos. Para realizar os cálculos necessários, o EMCMOT lê um arquivo de configuração (INI) onde estão descritos os parâmetros de configuração dos eixos, como o tipo de eixo (linear ou rotativo), fator de escala dos sensores, valores máximos de velocidade e aceleração e curso dos eixos (STAROVEŠKI et al., 2013).

Para a interpretação do código de programação de máquina-ferramenta, como o código G e o código M, o LinuxCNC conta com o módulo EMCTASK (*Enhanced Machine Controller Task*), que segue o padrão RS-274 NGC de linguagem de programação máquina-ferramenta (HASCOET, 2016). A sintaxe do código G utilizado pelo LinuxCNC é bem similar à sintaxe utilizada pelos controladores Fanuc (CNCCOOKBOOK, 2017).

2.7 SPRUTCAM

O SprutCAM é um *software* CAM que pode ser utilizado para a virtualização, programação e simulação de vários tipos de máquinas CNC, como fresadoras, tornos, centros de usinagem, robôs e máquinas especiais. O *software* permite a construção/configuração de máquinas virtuais, de acordo com a máquina real, e também permite a criação de código NC (*Controle Numérico*). É possível realizar a simulação do processo de usinagem, que leva em consideração os parâmetros da máquina virtual como, por exemplo, limite de curso e velocidade dos eixos; na simulação, ainda é possível adicionar outros eixos e equipamentos, como contraponto, luneta, morsas e eixos externos. O SprutCAM tem várias ferramentas para planejamento de usinagem de peças complexas em máquinas CNC de quatro, cinco ou mais eixos (COMAC, 2017).

Segundo Breaz (2015), definir uma nova máquina no SprutCAM envolve as seguintes etapas: dividir os componentes de cada eixo da máquina em arquivos de geometria 3D; abrir cada componente no SprutCAM e salvá-lo no formato .OSD; e

criar ou modificar um modelo pré-definido de um arquivo com extensão .XML - esse arquivo tem as definições cinemáticas e geométricas da máquina.

A mostra parte de um arquivo .XML de definição de uma máquina de 4 eixos.

Figura 7 - Exemplo de configuração de máquina de quatro eixos.

```

<Origin>
  <OriginLCS DefaultValue="WorkpieceLCS"/>
  <InitialX DefaultValue="Zero"/>
  <InitialY DefaultValue="Zero"/>
  <InitialZ DefaultValue="Zero"/>
</Origin>
<MachineStateParameters>
  <SCType ID="AxisXPos" type="TAxisXPosition"/>
  <SCType ID="AxisYPos" type="TAxisYPosition"/>
  <SCType ID="AxisZPos" type="TAxisZPosition">
    <InitialValue DefaultValue="300"/>
  </SCType>
  <SCType ID="AxisAPos" Caption="Axis A Position"
    <Address DefaultValue="A"/>
    <Group DefaultValue="RotaryAxis"/>
    <Priority DefaultValue="1"/>
    <Order DefaultValue="4"/>
  </SCType>

```

Fonte: Retirado de um arquivo de definição de máquina do SprutCAM 10, que foi disponibilizado junto ao *software*.

O SprutCAM tem muitas opções de pós processadores para os controladores mais utilizados no mercado, incluindo os comandos Fanuc (SPRUTCAM, 2017).

3 METODOLOGIA

A palavra pesquisa pode ter diferentes significados, dependendo do contexto envolvido e da interpretação de cada autor. Assim, a pesquisa pode ser conceituada como:

Processo através do qual a *ciência* busca dar respostas aos problemas que se lhe apresentam. Investigação sistemática de determinado assunto que visa obter novas informações e/ou reorganizar as informações já existentes sobre um *problema* específico e bem definido (APPOLINÁRIO, 2004, p.150)

As pesquisas utilizadas neste trabalho foram a qualitativa do tipo exploratório, a bibliográfica e a aplicada.

A pesquisa qualitativa, de acordo com Gerhardt e Silveira (2009), não se preocupa com a representatividade numérica, mas sim, com o aprofundamento da compreensão de um tema; já a pesquisa exploratória, de acordo com Prodanov e Freitas (2013), ocorre quando a pesquisa se encontra na fase preliminar e tem como objetivo o levantamento de informações sobre o assunto abordado. Nessa parte, na pesquisa qualitativa do tipo exploratório, todo o levantamento pertinente ao tema deste trabalho foi realizado, avaliando-se todas as possibilidades de como o projeto poderia ser executado, para então iniciá-lo. Foram feitas pesquisas de mercado sobre módulos prontos, sua estrutura e componentes, a fim de facilitar as tomadas de decisão do projeto, além de confirmar a importância do quarto eixo em ambientes industriais.

A pesquisa bibliográfica, de acordo com Tachizawa e Mendes (2006), é utilizada para entender e debater a revisão de literatura do tema da pesquisa; ela é feita por meio de consultas e análise em livros, artigos, trabalhos monográficos, jornais e enciclopédias (DEMO, 2000); assim, para esta pesquisa, foram consultadas bases de dados, sites indexados e sites de empresas que trabalham com os produtos analisados.

Finalmente, para a implantação do quarto eixo, objeto deste trabalho, foi realizada a pesquisa aplicada, a qual, de acordo com Barros e Lehfeld (2000), almeja produzir conhecimento a fim de aplicar os resultados, buscando a solução imediata para o problema encontrado na realidade. Para isso, foi estudado como seria feita construção do quarto eixo, quais conhecimentos seriam necessários adquirir, quais

materiais seriam adequados no seu desenvolvimento, bem como a metodologia que se empregaria de forma adequada na execução do projeto e, finalmente, como seria a análise da peça produzida, após a finalização do módulo.

3.1 MÉTODOS APLICADOS

A metodologia aplicada neste trabalho foi uma adaptação do método PRODIP que, segundo Back et al. (2008), possui três macrofases: Planejamento do Projeto, Elaboração do Projeto do Produto e Implementação do Lote Piloto.

Como o foco desta pesquisa não é fabricação do produto em larga escala, mas sim um produto personalizado e para uma máquina específica, a fase de Implementação do Lote Piloto, que consiste na produção em escala, lançamento e validação do produto no mercado, não foi realizada, utilizando-se apenas as fases de Planejamento do Projeto e Elaboração do Projeto do Produto.

Na fase de Planejamento de Projeto, há duas subdivisões: Planejamento de Produto, cujo principal objetivo é a definição da ideia do produto a ser desenvolvido em um determinado período e Planejamento de Projeto, em que é estabelecido o plano para o desenvolvimento das ideias de produto selecionadas (BACK et al., 2017). Na fase de Elaboração do Projeto do Produto, há quatro subdivisões: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado. No Projeto Informacional, ocorre o estabelecimento das especificações que orientarão o desenvolvimento técnico do produto; no Projeto Conceitual, é feita a busca de soluções conceituais para o problema, ou seja, alternativas são geradas e avaliadas técnica e economicamente, para enfim selecionar as que solucionam adequadamente o problema; no Projeto Preliminar, a parte de leiaute, arranjo, formas, geometrias, materiais e processos de fabricação da solução conceitual são desenvolvidas, além de modelos de análise, simulação e otimização da solução, nessa fase também é feita a construção e os testes de protótipos; por fim, há o Projeto Detalhado, que é onde os detalhes da solução otimizada são finalizados, além de ser onde os testes de protótipos são concluídos, onde se revisa a solução em detalhes e onde se prepara a documentação final do produto e da produção (BACK et al., 2017).

4 PLANEJAMENTO E PROJETO

Neste capítulo serão abordadas as etapas adotadas durante o planejamento e execução do projeto, que foram definidas a partir do método PRODIP as quais serão explicadas nos tópicos a seguir:

4.1 PLANEJAMENTO DO PRODUTO

A primeira etapa do projeto foi o planejamento do produto; em virtude do interesse do pesquisador por desenvolvimento de máquinas CNC, optou-se pela realização de um eixo adicional (rotativo) para a fresadora CNC Denford TRIAC PC.

4.2 PLANEJAMENTO DO PROJETO

Nesta segunda etapa, o plano de elaboração do projeto foi definido conforme

Tabela 1 - Plano de desenvolvimento do projeto.

Nº	Meta
M1	Fundamentação teórica
M2	Projeto do módulo da mesa rotativa
M3	Construção da mesa rotativa
M4	Integração da mesa rotativa à fresadora
M5	Configuração do LinuxCNC
M6	Configuração do sistema CAD/CAM SprutCAM
M7	Testes e análise dos resultados
M8	Elaboração da documentação

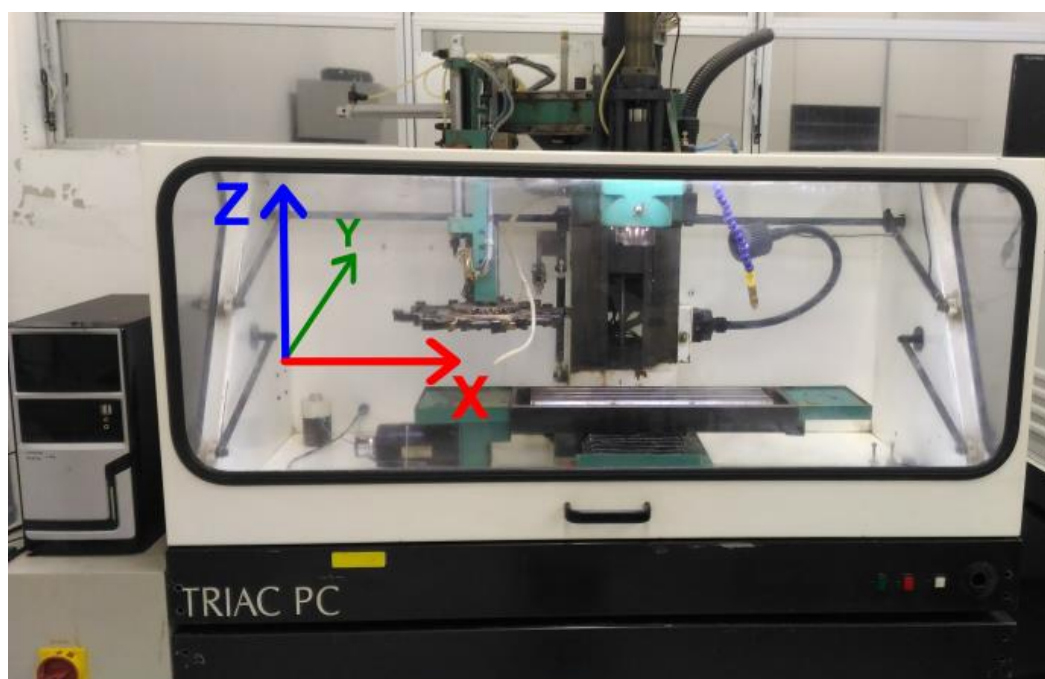
Fonte: Elaboração própria (2017).

4.3 PROJETO INFORMACIONAL

Com o intuito de se conhecer os tipos e configurações de máquinas de quatro eixos e módulos de eixos adicionais, para esta etapa do projeto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, cuja literatura está descrita no capítulo 2 (Fundamentação Teórica) deste documento; além disso, pesquisou-se como normalmente é feita a integração dos módulos adicionais com controladores de máquinas CNC. Outro estudo realizado nessa etapa foi sobre a fresadora Denford TRIAC PC, a qual foi escolhida para receber o módulo desenvolvido neste projeto; foram especificadas as suas características, como o sistema de coordenadas, disposição dos eixos, controlador e placa de interface. Esse último estudo está descrito detalhadamente nos parágrafos a seguir.

Por convenção, o sistema de coordenadas XYZ para fresadoras CNC é definido pela regra de Fleming, ou regra “da mão direita”, com a máquina sendo vista de frente. A fresadora Denford TRIAC PC segue essa convenção, como pode ser visto na .

Figura 8 - Sistema de coordenadas da fresadora Denford TRIAC PC.

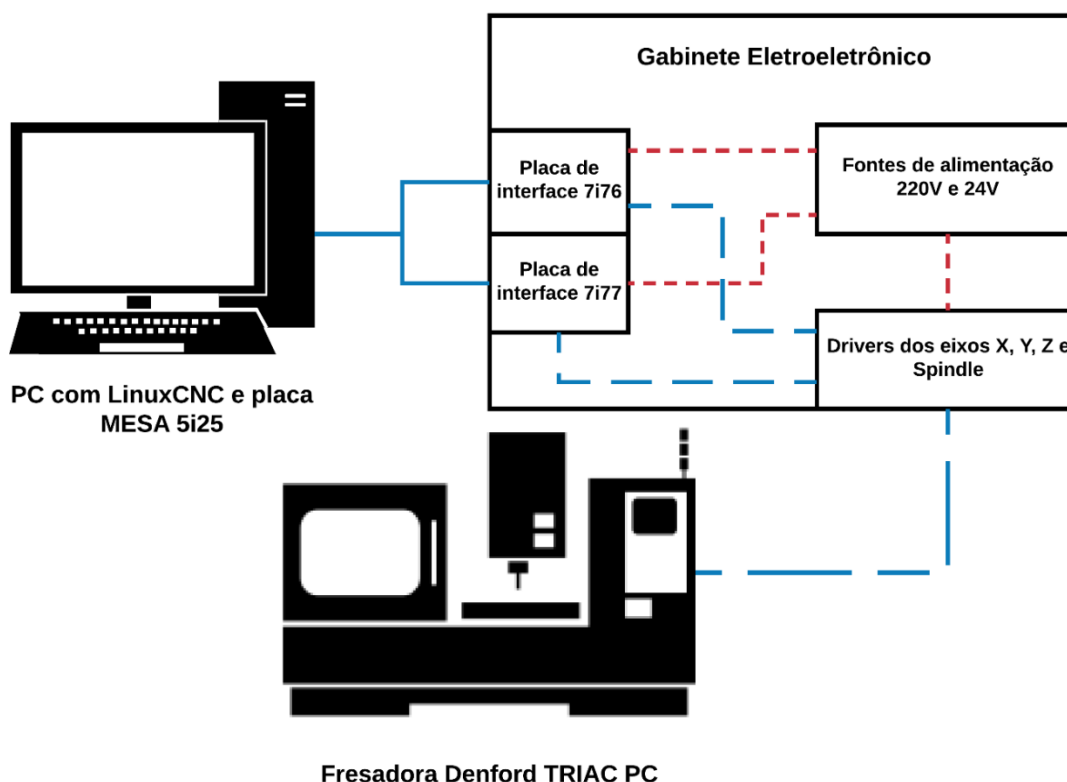


Fonte: Elaboração própria (2017).

A configuração dos eixos se dá da seguinte forma: o eixo Z, que contém o Spindle (motor que aciona a ferramenta de usinagem), se move, na direção vertical, de forma independente dos outros eixos; o eixo Y se move na horizontal e está posicionado perpendicularmente com a frente da máquina; por fim, o eixo X está montado sobre o eixo Y e se movimenta de forma paralela em relação à frente da máquina.

A fresadora usa controlador LinuxCNC, que está instalado em um PC dedicado para as operações relacionadas à máquina. Para realizar a interface entre o *software* CNC e a máquina, é utilizado um conjunto de placas de controle e acionamento da fabricante MESA; os modelos de placas, que já faziam parte da máquina, são o 5i25, o 7i76 e o 7i77, sendo que o modelo 5i25 fica instalado no computador, por meio de um slot PCI (Interconector de Componentes Periféricos). A máquina também conta com um gabinete elétrico que contém fontes de alimentação, drivers dos motores que acionam os eixos e as placas de interface MESA 7i76 e 7i77. Um esquemático da configuração da máquina pode ser visto na .

Figura 9 - Esquemático do sistema



Por fim, com base em módulos comerciais, como Kitagawa (2017) e CNC STEP USA (2017), e com base nos requisitos de usinagem estabelecidos pelo LAM, foram definidos os requisitos de projeto, que são apresentadas da .

Tabela 2 - Requisitos do Projeto

Requisito	Necessidade
Velocidade Angular	25 rpm (rotações por minuto)
Torque	50 Nm (Newton metro)
Resolução Angular	10 arco-segundo
Sensor de <i>home</i>	Sim

Fonte: Elaboração própria (2017).

4.4 PROJETO CONCEITUAL

Nesta etapa do projeto, foi escolhida a concepção do módulo do quarto eixo, a qual se baseou em princípios como a segurança, a modularidade e a elaboração de projeto para precisão.

Existem no mercado opções de eixos adicionais para fresadoras CNC prontos; porém, como o custo desses módulos é elevado, a proposta deste trabalho foi desenvolver um eixo adicional, já que todo o material e ferramentas necessárias estavam disponíveis na instituição (IFSC).

Para a construção do eixo rotativo, selecionou-se o conjunto de acionamento, composto por motor e driver. Duas opções estavam disponíveis no laboratório: um motor de passo Nema 23, com driver STR8 da Applied Motion, e um servomotor da Panasonic, modelo MUMS022A1EOS, com driver modelo MUDS023A1A. A mostra o comparativo entre as principais características das duas soluções.

Tabela 3 - Comparativo entre soluções de acionamento

Característica	Servomotor	Motor de passo com driver Applied Motion
Tensão de alimentação	220 VAC	24 a 75VDC
Torque	0,64 Nm	0,82 Nm
Velocidade angular máxima	3000 rpm	1000 rpm
Tipo de controle	Velocidade / Posição	Posição
Tipo de feedback	Encoder incremental com 2.500 linhas por revolução	-

Fonte: Elaboração própria (2017).

Após a comparação entre as duas opções de acionamento, optou-se por utilizar o servomotor, pois ele tem a velocidade angular máxima significativamente maior do que a velocidade angular do motor de passo e, também, por contar com uma solução de *feedback*, que garante que o motor esteja na posição comandada pelo controlador CNC, dentro de uma margem de erro conhecida; além disso, por não poder ser conectado diretamente à rede elétrica disponível, o motor de passo precisaria de uma fonte de alimentação adicional, devido à necessidade de alimentação em corrente contínua, gerando mais custos ao projeto.

Como o servomotor não atende ao requisito de torque do projeto, 50 Nm, foi necessário utilizar um redutor de velocidade, a fim de aumentar o torque resultante. No laboratório, havia duas opções de redutores de velocidade: a primeira era um redutor coroa e “sem fim”, com razão de redução de 90:1, e a segunda era um redutor cicloidal, com razão de redução de 105:1. A escolha para este projeto foi o redutor cicloidal, pois ele possui menor *backlash* e maior rendimento, se comparado aos redutores coroa e “sem fim”. Utilizando a razão de redução de 105:1 e o motor com 3000 rpm e 0,64 Nm, tem-se um torque de saída de 67,2 Nm e velocidade angular de 27,5 rpm. Levando em consideração esse cálculo, os requisitos mínimos de torque e velocidade angular do projeto, 50 Nm e 25 rpm, respectivamente, foram atendidos. Sabendo a nova razão de redução e também que o servomotor é acionado com 10.000 pulsos por revolução, tem-se que a resolução de acionamento do eixo é de

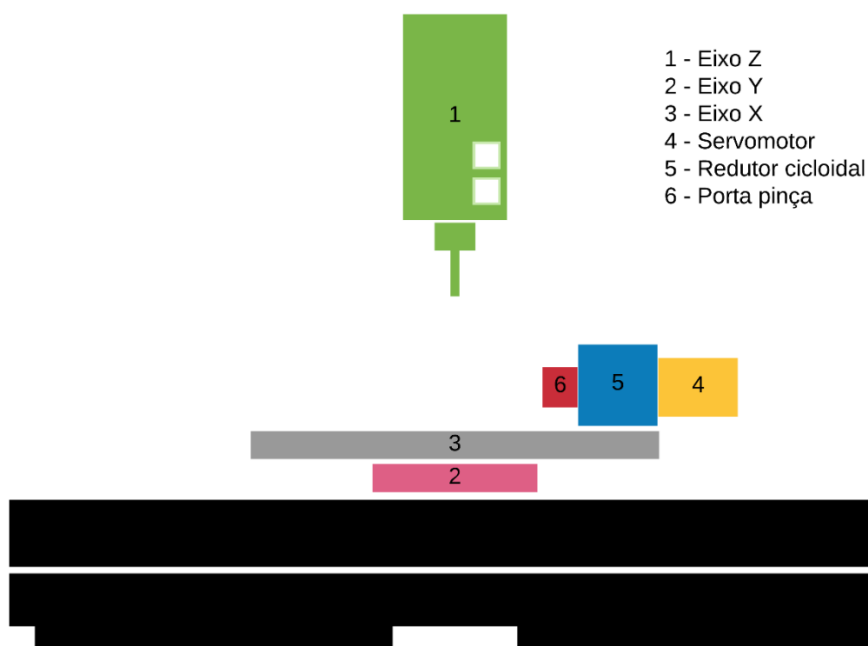
1,23 arco-segundo, que cumpre o requisito de resolução mínima de 10 arco-segundos.

Um dos requisitos de projeto é ter um sensor de *home*, o qual é um sensor que garante que a posição inicial do eixo rotativo seja sempre a mesma, mesmo que a máquina seja desligada; para que isso ocorra, é utilizada uma técnica de “zeramento” do eixo, já explicada no capítulo 2 (Fundamentação Teórica). Duas opções de sensores de *home* estavam disponíveis no laboratório: um sensor de contato mecânico e um sensor indutivo. Este último foi escolhido para o projeto, pelo fato de ser mais preciso e mais compacto em relação ao sensor mecânico; tal escolha garantiu maior mobilidade para que os outros eixos da máquina se movimentassem, sem causarem colisão com o sensor de *home* do eixo rotativo. Para obter uma melhor precisão na técnica de “zeramento” do eixo rotativo, junto ao sinal do sensor mecânico também se utilizou o sinal de *index* do servomotor, o qual é acionado uma vez a cada volta do motor.

A fresadora conta com uma mesa com rasgos “T” para a fixação de elementos sobre o eixo X, isso permite a possibilidade de fixação do módulo do eixo rotativo à fresadora, por meio de grampos ou barras roscadas e porcas “T”. A opção de grampos ocuparia muito espaço na área de trabalho da máquina, por isso, foi escolhida a opção de barras roscadas e porcas “T”. Para fixação da matéria prima à mesa rotativa, foi utilizado um cone porta pinça no padrão BT30, que estava disponível no laboratório.

Com base nas decisões feitas durante o projeto conceitual, foi elaborado o diagrama da , que ilustra a disposição dos elementos escolhidos; esse diagrama foi o ponto de partida para a fase de projeto preliminar.

Figura 10 - Diagrama conceitual



Fonte: Elaboração própria (2017).

4.5 PROJETO PRELIMINAR

Nesta etapa do projeto, o módulo construtivo e as interfaces dos sinais de comando foram detalhados; além disso, foram gerados os diagramas dos circuitos elétricos e o modelamento CAD, modelamento esse que, durante a sua elaboração, foi de grande utilidade para análise de montagem, cinemática e interferências. Também nessa fase, o protótipo foi construído e houve a integração do novo módulo ao sistema existente.

Para uma melhor organização, o projeto preliminar foi dividido em Projeto Mecânico, Projeto Eletroeletrônico, Parametrização do servo driver, Configuração do LinuxCNC e Virtualização da máquina no SprutCAM.

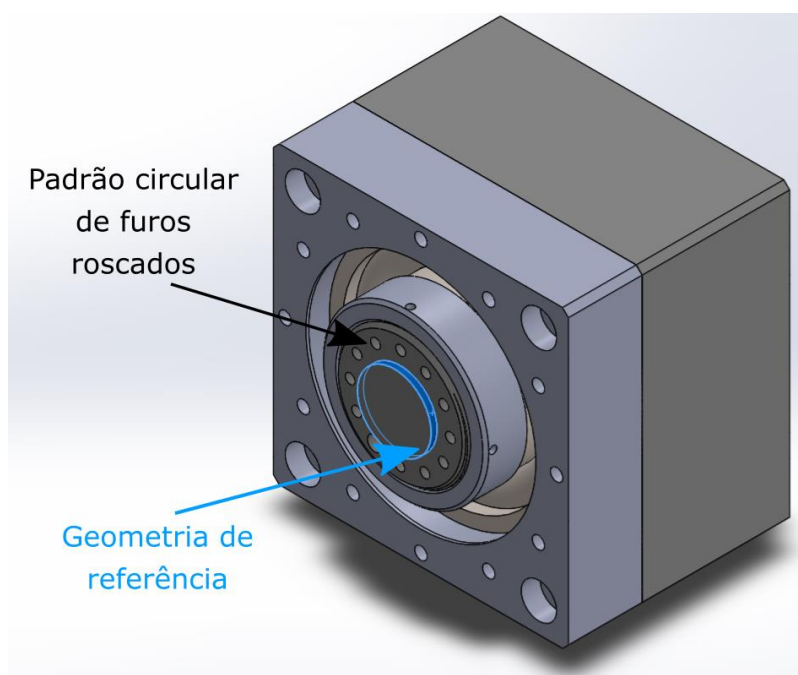
4.5.1 Projeto Mecânico

Com base no projeto conceitual, foi desenvolvido o projeto mecânico do eixo rotativo. Os modelos CAD do redutor cicloidal, do servomotor, do cone porta pinça e da fresadora Denford TRIAC PC foram utilizados como base para o projeto dos

outros elementos; as dimensões detalhadas desses quatro componentes são mostradas, respectivamente, nos Apêndices A, B, C e D.

O primeiro elemento projetado e fabricado foi uma peça de interface, que fixa o cone porta pinça ao eixo de saída do redutor cicloidal. Como qualquer desalinhamento entre o eixo de saída do redutor cicloidal e o cone porta pinça poderiam ocasionar erro de posicionamento da peça a ser usinada, geometrias de referência foram utilizadas para garantir o posicionamento. O eixo de saída do redutor cicloidal possui uma geometria circular de referência, justamente para que elementos acoplados ao eixo possam ser alinhados. O eixo também conta com furos roscados M4, dispostos em um padrão circular, para que elementos possam ser fixados. A imagem indica a geometria de referência e os furos roscados.

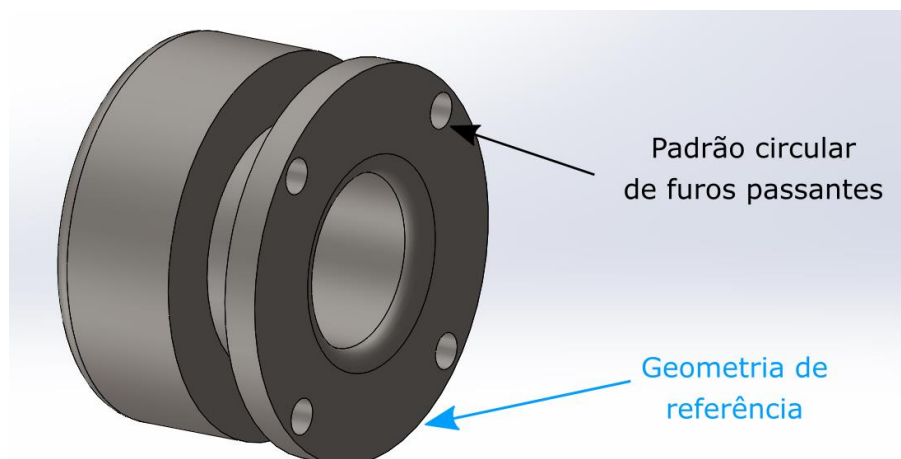
Figura 11 - Detalhe do eixo de saída do redutor cicloidal



Fonte: Elaboração própria (2017).

O cone porta pinça também conta com uma geometria de referência, que é concêntrica ao seu eixo central e contém furos passantes para fixação. Ambos os detalhes são indicados na .

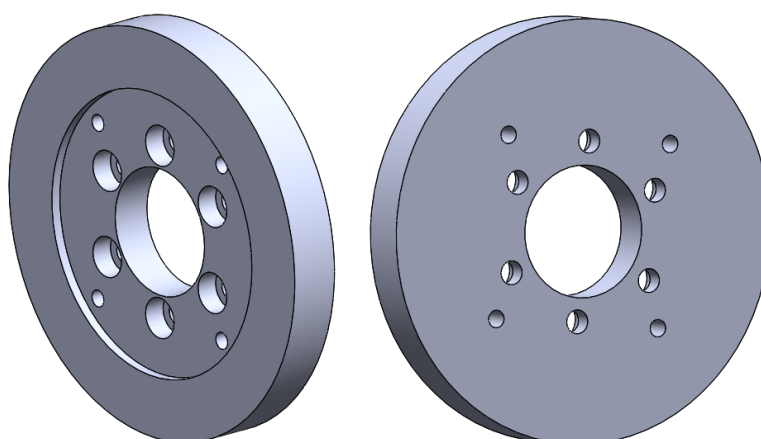
Figura 12 - Detalhamento do cone porta pinça



Fonte: Elaboração própria (2017).

A partir daí, a peça de interface foi projetada, levando em consideração as geometrias de referência e os padrões de furação do eixo de saída do redutor cicloidal e do cone porta pinça. As dimensões da peça projetada estão presentes no Apêndice E., A indica o modelo CAD da peça de interface.

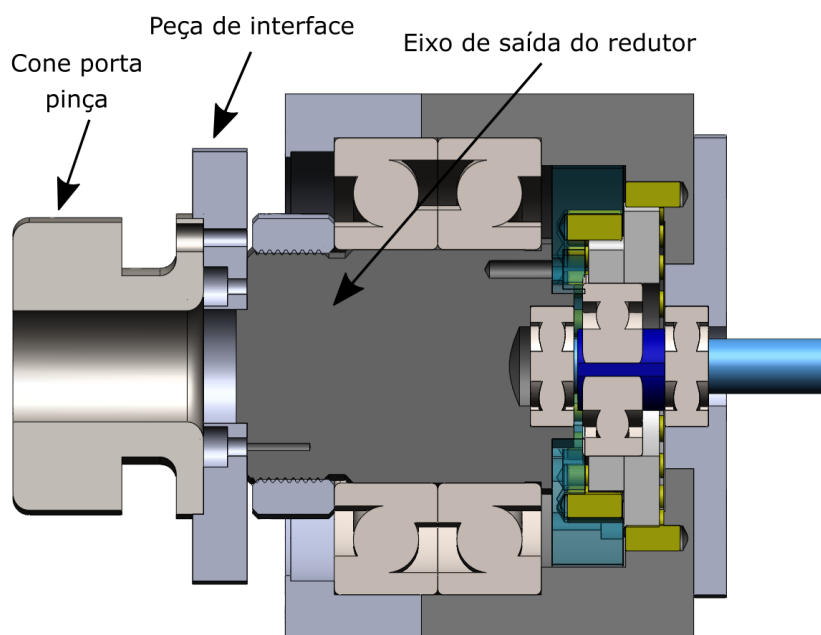
Figura 13 - Peça de interface entre redutor e cone porta pinça



Fonte: Elaboração própria (2017).

A apresenta a montagem em vista de corte dos três elementos: redutor cicloidal, peça de interface e cone porta pinça. Tal peça foi fabricada no Laboratório de Máquinas Operatrizes (MOP) do IFSC Câmpus Florianópolis, utilizando como matéria prima o ferro fundido.

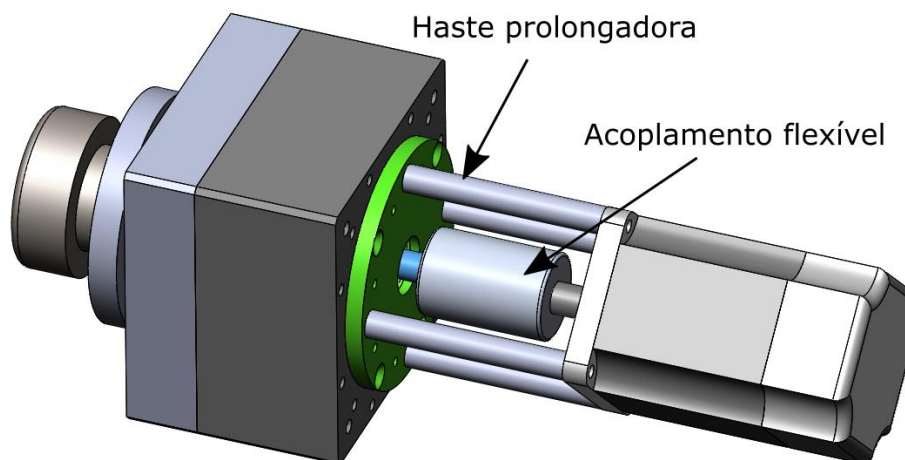
Figura 14 - Detalhe da montagem do redutor, peça de interface e cone porta pinça



Fonte: Elaboração própria (2017).

O redutor cicloidal tem vários padrões de furação para a fixação de motores, incluindo o padrão de furação utilizado pelo servomotor. Para realizar a fixação do servomotor ao redutor, foi preciso fabricar quatro hastes prolongadoras - o desenho técnico dessas hastes está no Apêndice F. Para acoplar o eixo de entrada do redutor ao eixo do motor, foi utilizado um acoplamento flexível; esse tipo de acoplamento tem como característica compensar desalinhamentos que possam existir entre os dois eixos acoplados. A mostra a montagem em CAD do servomotor e redutor.

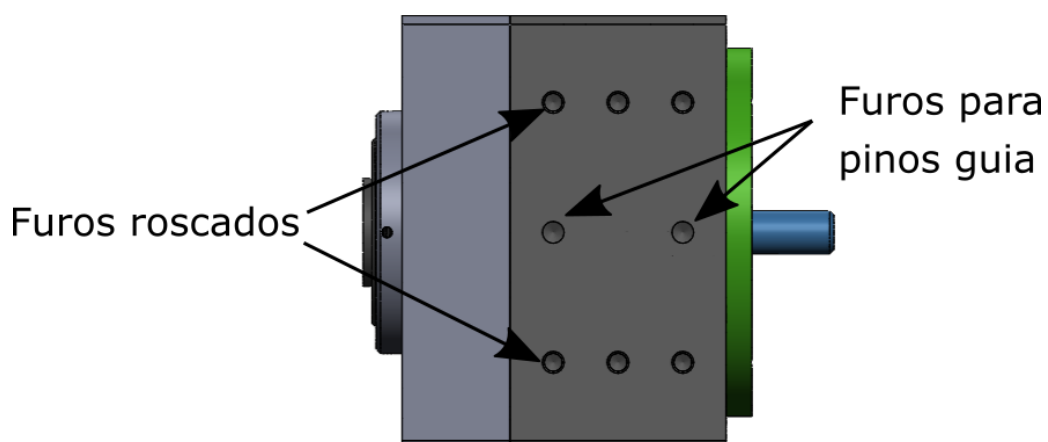
Figura 15 - Modelo CAD da montagem do servomotor e redutor



Fonte: Elaboração própria (2017).

Garantir o alinhamento entre o módulo rotativo e o eixo X da fresadora é primordial para que ela realize uma usinagem com precisão. Para realizar a fixação do redutor à mesa da fresadora, outra peça de interface precisou ser projetada; no projeto dessa nova peça de interface, foi levado em consideração que a mesa da fresadora tem rasgos “T” alinhados com o eixo X da máquina e que o redutor cicloidal tem dois furos em sua base, para pinos guia e furos roscados para fixação, como é indicado na .

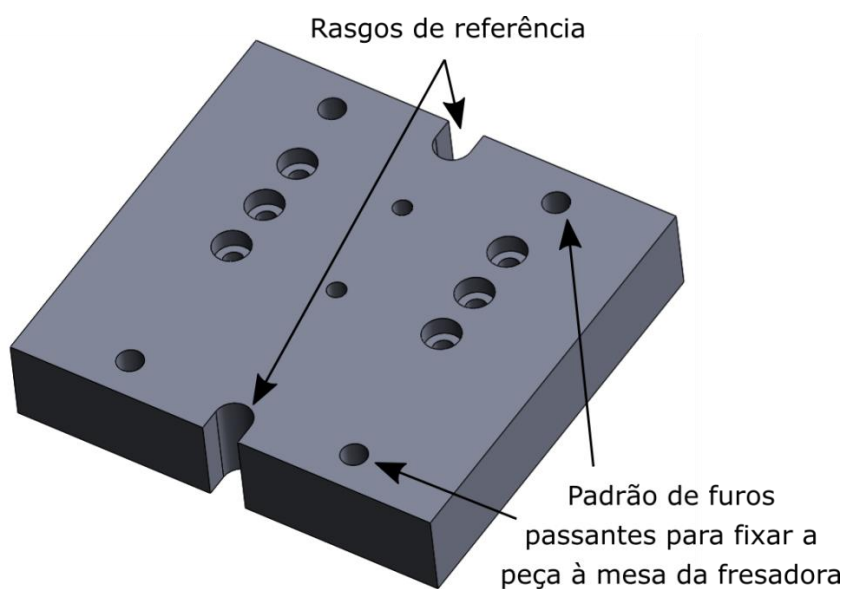
Figura 16 - Detalhe inferior do redutor cicloidal



Fonte: Elaboração própria.

O desenho técnico da peça de interface projetada é mostrado no Apêndice G . A mostra a peça projetada, indicando os furos passantes e rasgos de referência, que são utilizados para fixar e alinhar a peça à mesa da fresadora.

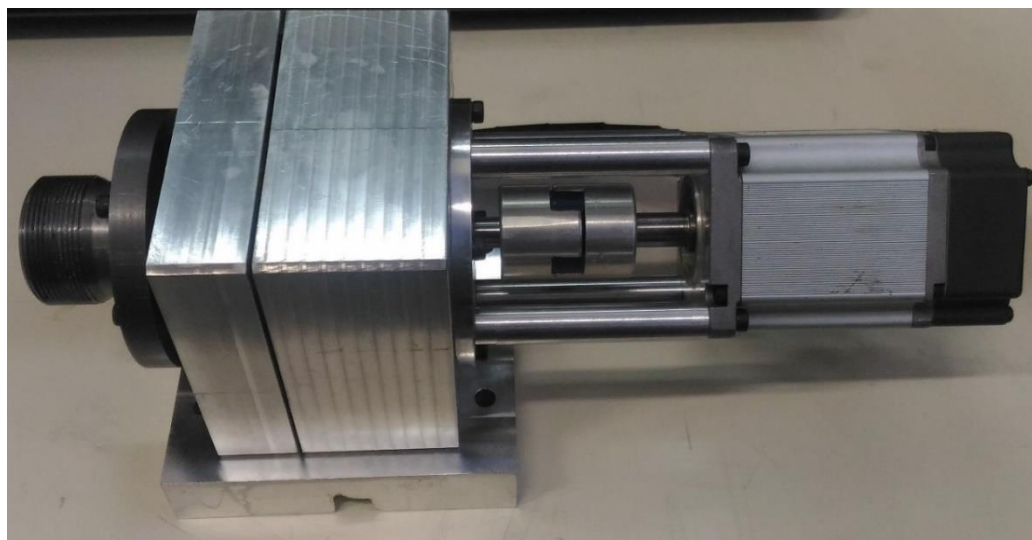
Figura 17 - Detalhes da peça de interface entre mesa da fresadora e redutor



Fonte: Elaboração própria (2017).

A mostra o módulo da mesa rotativa, que foi montado utilizando as peças projetadas e fabricadas anteriormente.

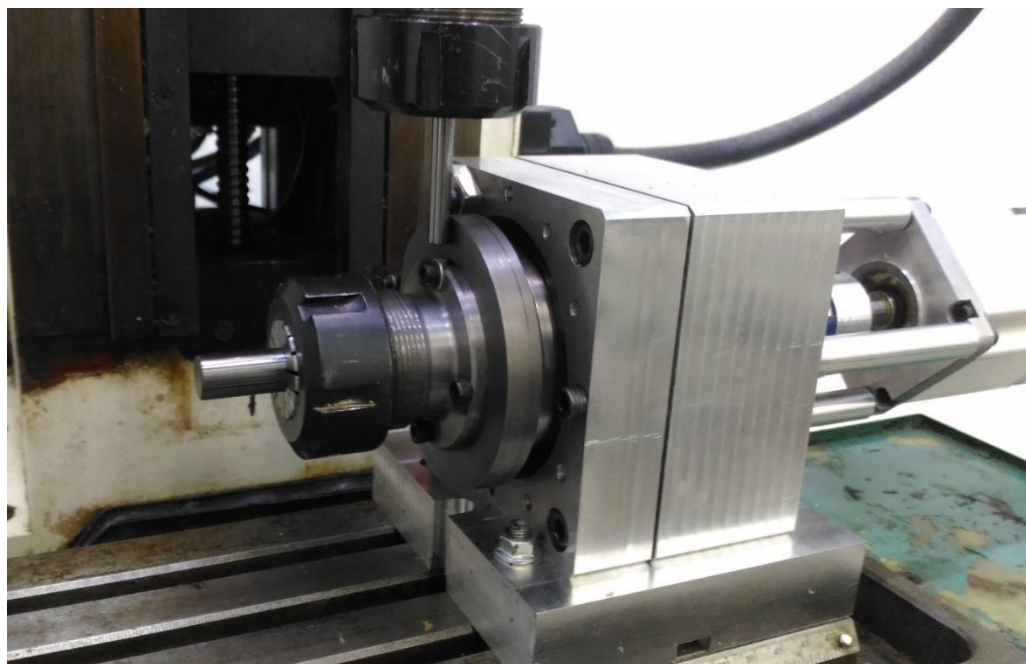
Figura 18 - Módulo da mesa rotativa construído.



Fonte: Elaboração própria (2017).

A mostra o módulo fixado à fresadora utilizando porcas, porcas “T” e barras roscadas.

Figura 19 - Módulo rotativo fixado à fresadora.



Fonte: Elaboração própria (2017).

4.5.2 Projeto Eletroeletrônico

Com o módulo rotativo montado e fixado à mesa da fresadora, o próximo passo foi fixar o servodriver ao gabinete elétrico e elaborar os diagramas de potência e de sinal.

De acordo com o site da empresa Panasonic (2017), o servodriver precisa ser alimentado com uma fonte de tensão de corrente alternada de 220 V, podendo ser monofásica ou trifásica. O Anexo A contém um diagrama retirado do manual do servodriver, o qual mostra um exemplo de conexão dos sinais lógicos, para que o servodriver opere no modo de controle de posição. Como pode ser observado nesse mesmo anexo, o servodriver possui um circuito lógico que deve ser alimentado por meio dos terminais “COM+” e “COM-”, por uma fonte de tensão de corrente contínua de 12 a 24 V.

O “SRV-ON” é uma entrada do servodriver que deve ser conectada ao terminal “COM-”, a fim de que o servodriver habilite a saída de potência para o servomotor. Para garantir a segurança na operação da máquina, entre o sinal “COM+” do servodriver e a fonte de 24 V foi adicionado um relé, o qual é acionado pelo circuito de intertravamento do controlador LinuxCNC.

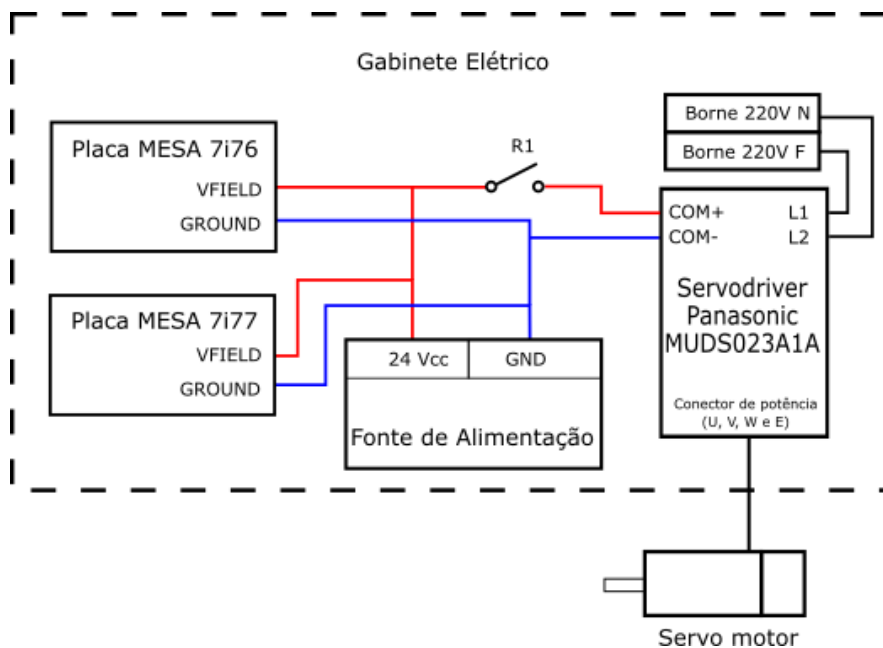
As entradas “PULS1”, “PULS2”, “SIGN1” e “SIGN2” são responsáveis por receber os sinais de comando e podem operar em três modos: comando de pulso por quadratura, comando de pulso no sentido horário ou anti-horário ou comando de pulso STEP/DIR. Como a placa geradora de pulsos de comando MESA 7i76 tem a opção de gerar pulsos no padrão STEP/DIR, esta foi a opção de operação escolhida para o servodriver.

O diagrama do Anexo Atambém indica três saídas diferenciais que dão acesso aos sinais gerados pelo encoder, são elas a “OA”, “OB” e “OZ”. Neste projeto, só é de interesse a saída “OZ”, que é o sinal do pulso index do encoder, pois ela será utilizada pelo controlador LinuxCNC, que usa o sinal do sensor de contato mecânico e o sinal “OZ” para realizar a sequência de referenciamento do eixo. O sinal “OZ” é conectado diretamente à placa MESA 7i77. O sensor de contato mecânico aciona um sinal elétrico, que vem de uma fonte de tensão de 24 V para uma entrada da placa MESA 7i76. As conexões de potência e de sinais de encoder entre o servomotor e o servodriver foram realizadas utilizando cabos prontos, que já estavam disponíveis.

Nessa etapa, também foi necessário adicionar um botão de emergência à máquina, pois o botão de emergência existente estava em posição desfavorável para ser acionado em situações de emergência. Para isso, foi utilizado um botão de emergência com um contato elétrico normalmente fechado, que faz o acionamento de um pino de entrada da placa MESA 7i77.

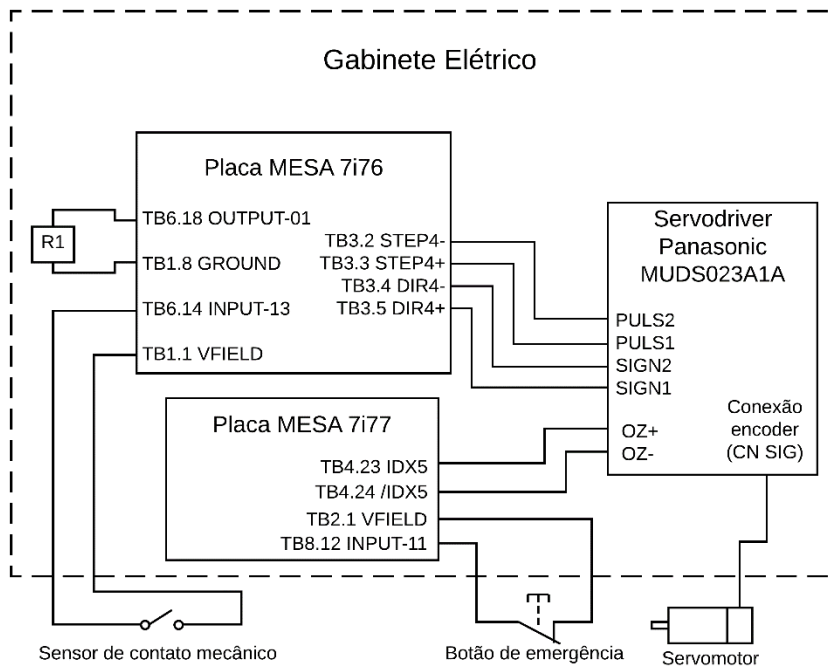
De acordo com as especificações anteriores, foi criado o diagrama de potência, Figura 20, e o diagrama de sinais, Figura 21. Com base nos diagramas, as conexões elétricas necessárias foram feitas no gabinete elétrico.

Figura 20 - Diagrama de potência



Fonte: Elaboração própria (2017).

Figura 21 - Diagrama de sinais



Fonte: Elaboração própria (2017).

4.5.3 Parametrização do servo driver

Para realizar a parametrização, o manual de operação foi consultado; a partir daí, estabeleceu-se que cinco parâmetros lá descritos são importantes para este projeto. A lista estes parâmetros, junto às suas descrições, seus valores padrão e seus valores escolhidos. Para efetuar a alteração dos parâmetros do servo driver, foi utilizado o *software* Panaterm, que é disponibilizado pelo fabricante.

Tabela 4 - Parâmetros alterados no servo driver

Parâmetro	Descrição	Valor Padrão	Valor Utilizado
02	Configuração do modo de controle	0	0
42	Tipo de entrada de comando	1	3
46	Numerador da razão do pulso de comando	10000	10000
4A	Multiplicador da razão do pulso de comando	0	0
4B	Denominador da razão do pulso de comando	10000	9000

Fonte: Elaboração própria (2017).

O parâmetro “02”, mostrado na , indica qual será o tipo de controle utilizado; o valor escolhido para ele foi “0”, que corresponde ao controle de posição. O parâmetro “42” indica o tipo de entrada de comando que o servo driver irá receber, o valor utilizado para ele foi “3”, que corresponde a entrada de comando no padrão STEP/DIR.

Os parâmetros “46”, “4A” e “4B” são utilizados pelo servo driver para realizar o que é chamado de “escala de comando”. Para a definição desses três parâmetros, a Equação 1 é utilizada:

$$f = \frac{10000 * Pr\ 4B}{Pr\ 46 * 2^{Pr\ 4A}} \quad (1)$$

Onde “f” é o número de pulsos de comando necessários para que o motor dê uma volta completa.

Para definir o valor de “f”, foi utilizado o conceito do parâmetro “STEP_SCALE” do LinuxCNC, que corresponde ao número de passos de comando necessários para o eixo rotacione em um grau. Para calcular quantos pulsos são necessários para que o eixo rotacione um grau (“pp1”), a Equação 2 é utilizada:

$$pp1 = \frac{f * 105}{360} \quad (2)$$

Substituindo a Equação 1 na Equação 2, foi possível chegar à Equação 3:

$$pp1 = \frac{10000 * 105 * Pr\ 4B}{360 * Pr\ 46 * 2^{Pr\ 4A}} \quad (3)$$

Utilizando a Equação 3 e os valores padrão de configuração do servo driver, foi calculado um valor para “pp1” de 2916,6, ou seja, seria necessário o controlador dar 2916,6 comandos para que o eixo rotacionasse um grau. Como o parâmetro “STEP_SCALE” do LinuxCNC deve ser configurado com um número inteiro, os valores escolhidos para “46”, “4A” e “4B” foram, respectivamente, “10000”, “0” e “9000”, resultando em um “pp1” igual a 2625.

Para o funcionamento do conjunto de acionamento, é necessário haver um bom controle de posição do eixo do motor; o servo driver utiliza internamente um controlador PID para efetuar esse controle. Os ajustes dos ganhos do controlador estão disponíveis por meio de parâmetros do servo driver, porém, o *software* Panatorm disponibiliza uma ferramenta chamada de *Auto-tunning*, que realiza uma sequência de acionamentos no motor, de modo a determinar automaticamente os valores para os ganhos do controlador. Para este projeto, a ferramenta *Auto-tunning*

foi utilizada e o resultado obtido foi satisfatório, por isso, não foi necessária a configuração individual dos parâmetros de controle.

4.5.4 Configuração do LinuxCNC

Como citado no capítulo 2 (Fundamentação Teórica) deste documento, a configuração da máquina no LinuxCNC ocorre em duas etapas: uma é a configuração do arquivo .INI e a outra é a configuração do arquivo .HAL.

As configurações adicionadas ou modificadas no arquivo .INI, para o correto funcionamento do eixo rotativo, foram apresentadas na .

Tabela 5 - Descrição das configurações utilizadas no arquivo .INI.

Seção	Propriedade	Valor
DISPLAY	GEOMETRY	Xyza
TRAJ	AXES	4
TRAJ	COORDINATES	X Y Z A
AXIS_3	TYPE	ANGULAR
AXIS_3	FERROR	5.0
AXIS_3	MIN_ERROR	0.1
AXIS_3	MAX_VELOCITY	80.0
AXIS_3	MAX_ACCELERATION	800.0
AXIS_3	STEPGEN_MAXVEL	88.0
AXIS_3	STEPGEN_MAXACCEL	880.0
AXIS_3	DIRSETUP	1000
AXIS_3	DIRHOLD	1000
AXIS_3	STEPLEN	1000
AXIS_3	STEPSPACE	1000
AXIS_3	STEP_SCALE	-2625
AXIS_3	MIN_LIMIT	-1e99
AXIS_3	MAX_LIMIT	1e99
AXIS_3	HOME_SEARCH_VEL	-50.0

AXIS_3	HOME_LATCH_VEL	-1.0
AXIS_3	HOME_USE_INDEX	YES
AXIS_3	HOME_SEQUENCE	2

Fonte: Elaboração própria (2017).

Das configurações apresentadas na , a configuração da seção “DISPLAY” é referente à interface gráfica do LinuxCNC, as configurações da seção “TRAJ” são referentes ao controle de trajetórias e as configurações da seção “AXIS_3” são específicas para o eixo rotativo, que foi integrado à máquina. O Apêndice H e o Apêndice I contêm o arquivo .INI completo, utilizado neste projeto.

Na etapa de configuração do arquivo .HAL, a primeira modificação feita no arquivo original foi no comando que carrega o módulo do driver da placa MESA 5i25; esse comando especifica alguns parâmetros passados como referência para o funcionamento do driver. O parâmetro “num_stepgens”, que indica quantos geradores de passo a placa deve utilizar, foi alterado de “4” para “5”.

Para a configuração dos sinais utilizados, é necessário realizar a conexão entre sinais e pinos físicos no arquivo .HAL; o comando “net” realiza essas conexões através dos operadores “<=”, “=>” e “<=>”, que definem as direções de leitura e escrita dos sinais. Como exemplo, o comando “net home-a <= hm2_5i25.0.7i76.0.3.input-13” indica que o sinal lido da porta física “input-13” da placa 7i76 será associado ao sinal interno “home-a”, após isso, foi necessário enviar o sinal “home-a” ao sinal “axis.3.home-sw-in”; o sinal “axis.3.home-sw-in” é utilizado pelo controlador para realizar a sequência de *home*. Esse procedimento foi realizado para todos os outros sinais de interesse deste projeto; a associação desses sinais está descrita na .

Tabela 6 - Descrição dos sinais do .HAL

Sinal de origem	Sinal de destino
hm2_5i25.0.7i76.0.3.input-13	axis.3.home-sw-in
axis.3.amp-enable-out	hm2_5i25.0.stepgen.04.enable
axis.3.motor-pos-cmd	hm2_5i25.0.stepgen.04.position-cmd
hm2_5i25.0.stepgen.04.position-fb	axis.3.motor-pos-fb

hm2_5i25.0.7i77.0.0.input-11-not

classicladder.0.in-22

 Fonte: Elaboração própria (2017).

Outra configuração que precisou ser feita foi a parametrização do gerador de passos da placa 5i25. Para isso, foi utilizado o comando “setp”, que funciona da seguinte forma: “setp <parâmetro> <valor>”. O “<valor>” pode ser uma propriedade configurada no arquivo .INI; assim, no lugar de “<valor>” deve ser utilizado o nome da seção e o nome da propriedade desejada, por exemplo “setp hm2_5i25.0.stepgen.04.dirsetup [AXIS_3]DIRSETUP”. A apresenta os parâmetros modificados, juntamente com seus valores.

Tabela 7 - Parâmetros e valores do gerador de passos

Parâmetro	Valor
hm2_5i25.0.stepgen.04.dirsetup	[AXIS_3]DIRSETUP
hm2_5i25.0.stepgen.04.dirhold	[AXIS_3]DIRHOLD
hm2_5i25.0.stepgen.04.steplen	[AXIS_3]STEPLEN
hm2_5i25.0.stepgen.04.stepspace	[AXIS_3]STEPSPACE
hm2_5i25.0.stepgen.04.position-scale	[AXIS_3]STEP_SCALE
hm2_5i25.0.stepgen.04.step_type	0
hm2_5i25.0.stepgen.04.maxaccel	[AXIS_3]STEPGEN_MAXACCEL
hm2_5i25.0.stepgen.04.maxvel	[AXIS_3]STEPGEN_MAXVEL

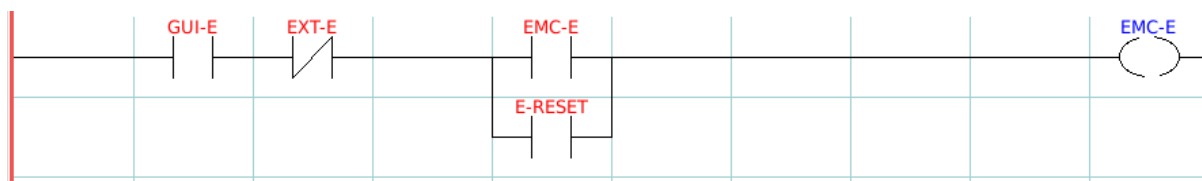
 Fonte: Elaboração própria (2017).

O arquivo .HAL completo, utilizado neste projeto, está descrito no Apêndice J e vai até o Apêndice O.

Na configuração do arquivo .HAL, o sinal do botão de emergência foi conectado a um sinal lógico do Classic Ladder. Para o correto funcionamento do circuito de intertravamento, foi necessário reconfigurar o diagrama Ladder, incluindo

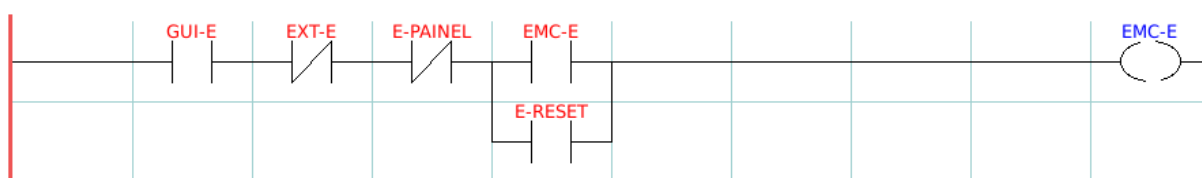
o sinal do botão de emergência, que foi nomeado “E-PAINEL”. As 23 mostram o diagrama Ladder antes e depois da modificação.

Figura 22 - Diagrama Ladder antes da modificação.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Figura 23 - Diagrama Ladder depois da modificação.



Fonte: Elaboração própria (2017).

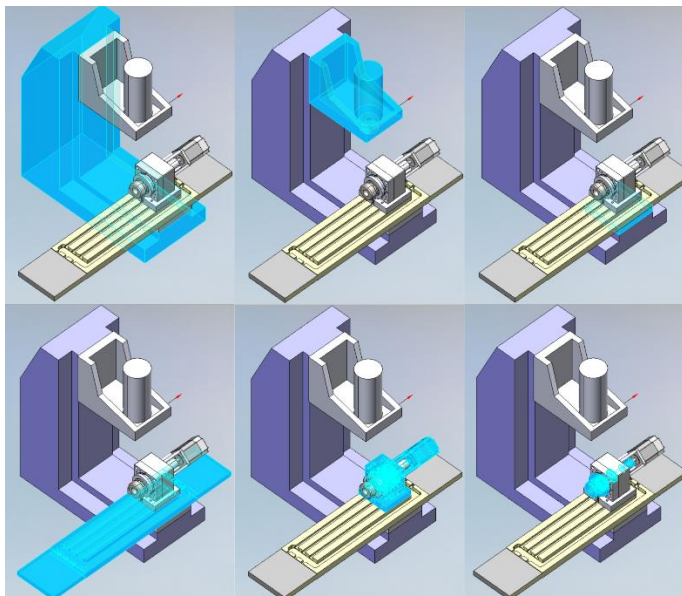
4.5.5 Virtualização da máquina no SprutCAM

A virtualização da máquina no SprutCAM pode ocorrer de duas maneiras: a primeira é a criação/edição de um arquivo no formato .XML, que contém todas as definições da máquina, como cadeia cinemática, limite de curso dos eixos, dados de localização da ferramenta e dados do sistema de coordenadas da peça, porém, o fabricante do *software* SprutCAM não disponibiliza documentação satisfatória sobre a estrutura do arquivo .XML utilizado na definição das máquinas. A segunda maneira é a partir de um módulo do SprutCAM, chamado de Machine Maker, o qual permite a criação/edição de máquinas por meio de elementos visuais. Neste projeto, para fazer a virtualização, foi utilizado o Machine Maker.

O primeiro passo para realizar a virtualização é ter o modelamento CAD da máquina. Em seguida, é necessário abrir o modelo CAD no *software* SprutCAM e agrupar os elementos estruturais por regiões de interesse, como estrutura da base,

eixo X, eixo Y, eixo Z, parte fixa do eixo A e parte móvel do eixo A, conforme mostrado na .

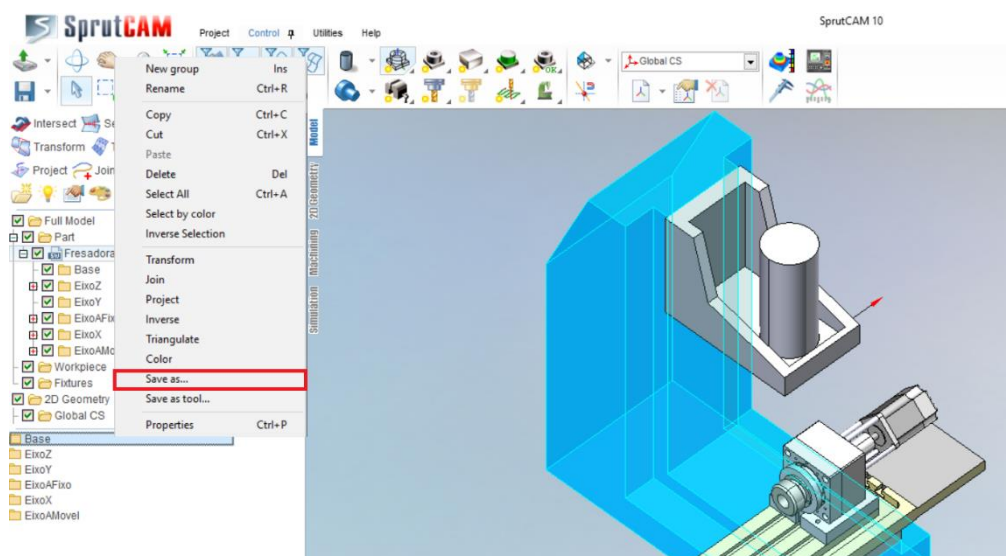
Figura 24 - Agrupamento dos elementos estruturais da máquina



Fonte: Elaboração própria (2017).

Após o agrupamento dos elementos, é necessário salvar esses grupos no formato .OSD; para isso, basta clicar com o botão direito em cima do nome do grupo e ir na opção “Salvar como”, conforme ilustrado na .

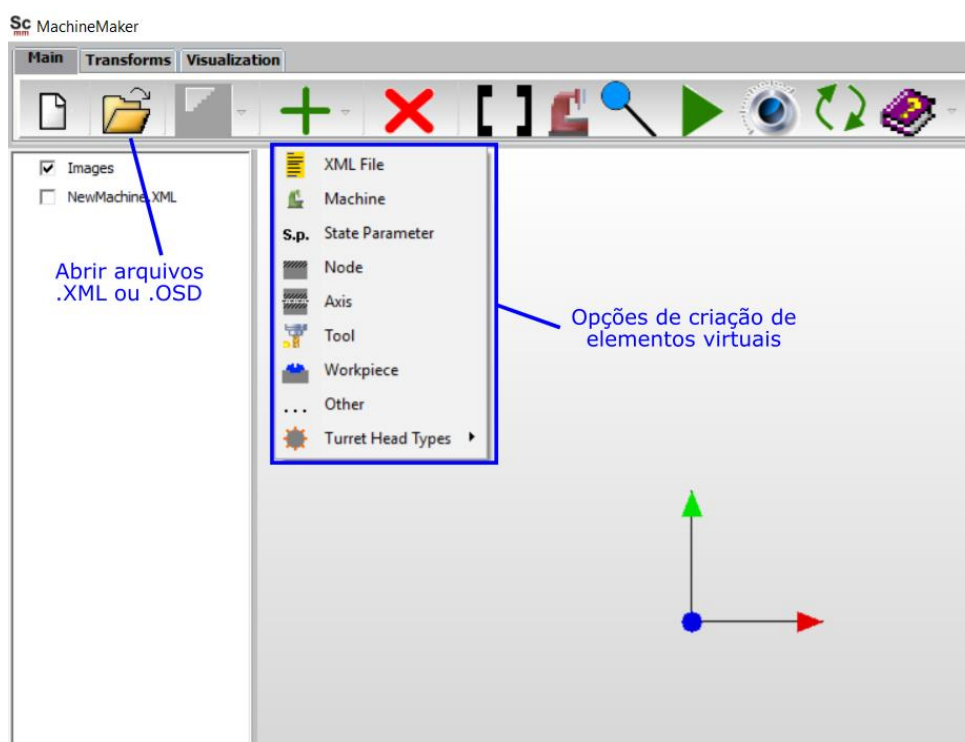
Figura 25 - Como salvar o modelo no formato .OSD



Fonte: Elaboração própria (2017).

Salvos todos os grupos, o próximo passo é abrir o módulo Machine Maker, onde o usuário pode abrir arquivos .XML ou .OSD, transladar e rotacionar elementos visuais, criar de elementos virtuais, montar e configurar a estrutura da máquina. Elementos virtuais podem ser eixos, nós, máquinas, parâmetros de estado, arquivos .XML, ponto de inserção da ferramenta e sistema de coordenadas da peça, conforme mostrado na .

Figura 26 - Interface do Machine Maker

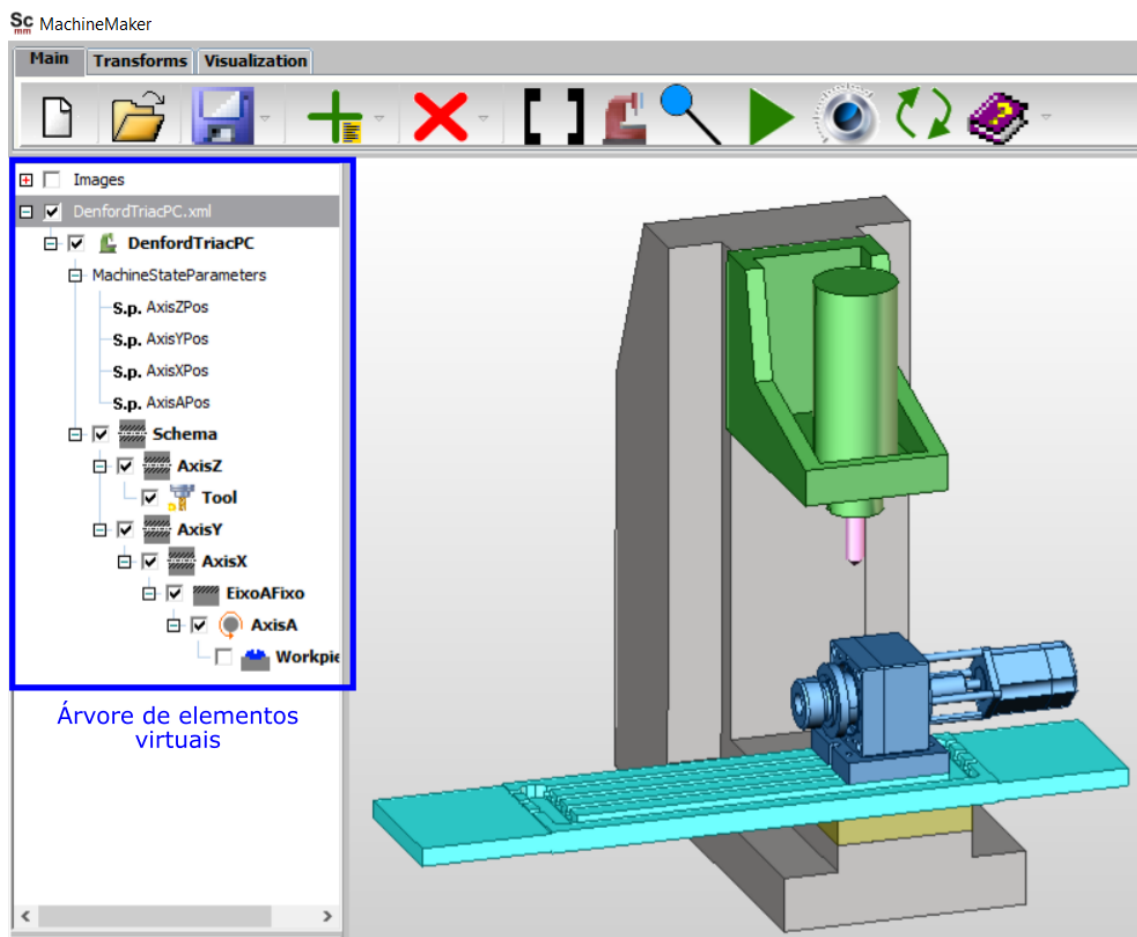


Fonte: Elaboração própria (2017).

O processo de criação de uma nova máquina no Machine Maker pode ser feito seguindo as seguintes etapas: abertura dos arquivos .OSD, criação do arquivo virtual .XML, criação do elemento virtual Máquina, criação dos eixos necessários, associação dos modelos .OSD importados aos eixos criados, criação do elemento de ponto de inserção da ferramenta e criação do sistema de coordenadas da peça. A mostra a fresadora Denford TRIAC PC virtualizada e também como deve ser a árvore de elementos virtuais. Os elementos do item "MachineStateParameters" da árvore de elementos definem as configurações dos eixos, como limite do curso, posição inicial e incremento durante movimentações. Finalizada a criação da máquina, há uma opção que a exporta do Machine Maker para ser utilizada no SprutCAM.

Não foi necessária a criação de um Pós-Processador para a máquina virtualizada, pois o Pós-Processador para o comando Fanuc 30i, que está disponível no SprutCAM, tem um alto grau de compatibilidade com o LinuxCNC.

Figura 27 - Fresadora Denford TRIAC PC virtualizada no Machine Maker



Fonte: Elaboração própria (2017).

4.6 PROJETO DETALHADO

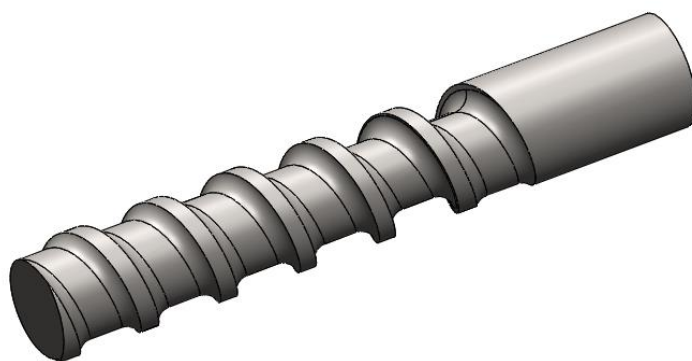
A última fase do projeto indica como as otimizações foram efetuadas no decorrer do Projeto Preliminar - não houve necessidade de se fazer mais otimizações, uma vez que elas foram realizadas no Projeto Preliminar. A elaboração do documento do projeto - este trabalho final - que contém modelos CAD, diagramas, fluxogramas, programas e circuitos eletroeletrônicos também foi feita durante essa fase.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para avaliar o resultado final do eixo rotativo implementado, um fuso injetor foi usinado e foram realizadas medições metrológicas para comparar a peça projetada com o resultado obtido durante a usinagem.

A programação de usinagem foi feita utilizando a máquina virtual no SprutCAM. A mostra o modelo CAD da peça.

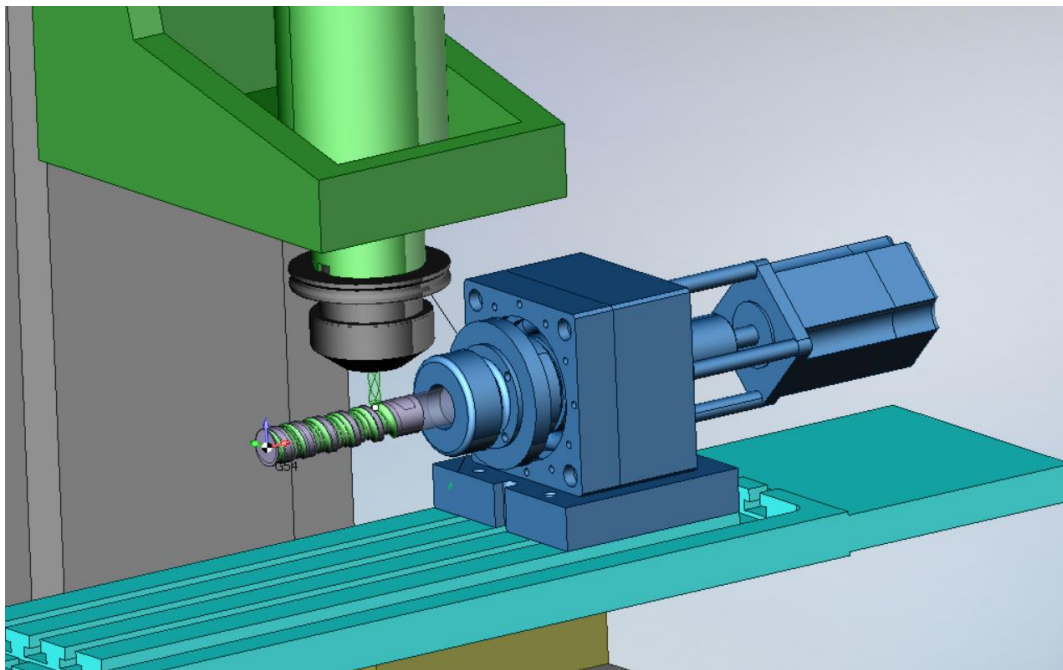
Figura 28 - Modelo CAD do fuso injetor



Fonte: Elaboração própria (2017).

A seguir, a mostra a simulação realizada no SprutCAM utilizando a máquina virtual.

Figura 29 - Simulação da usinagem do fuso injetor



Fonte: Elaboração própria (2017).

Por fim, a mostra a peça usinada.

Figura 30 - Fuso injetor usinado



Fonte: Elaboração própria (2017).

Durante a usinagem, o eixo rotativo vibrou de forma inesperada quando realizava alguns movimentos, esse problema será abordado na análise e discussão dos resultados.

A peça usinada foi levada para o Laboratório de Metrologia do IFSC - Câmpus Florianópolis, onde foi utilizada a máquina de medição por coordenadas para medir o passo da rosca do fuso injetor e o raio de curvatura do filete da rosca. A apresenta os valores projetados e os valores medidos no Laboratório de Metrologia.

Tabela 8 - Resultados da medição da peça usinada

Região medida	Valor projetado (mm)	Valor medido (mm)
Passo da rosca	15,000	15,001
Raio do filete	3,000	3,013

Fonte: Elaboração própria (2017).

5.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante a usinagem da peça, foi observado que ela ocorreu conforme a simulação em *software* CAM. Analisando a , nota-se que o erro de usinagem do passo da rosca foi de 1 μm , que é um valor que aceitável, visto que a resolução dos eixos X, Y e Z da fresadora é de 2 μm e do eixo A é de 1,23 arco-segundo. O erro de usinagem do raio do filete foi de 13 μm , que é um valor alto, principalmente se for levado em consideração o baixo erro do passo da rosca.

Para que se possa determinar a causa do erro de usinagem do raio do filete, mais peças devem ser usinadas e analisadas, porém, acredita-se que vibrações inesperadas do eixo rotativo são a causa dessa variação; as vibrações podem ter acontecido por folgas internas no redutor cicloidal ou pela necessidade de reparametrização do controlador PID. Para uma melhor análise, seria necessário verificar os parâmetros de configuração do controlador e desmontar o módulo, a fim de verificar o redutor cicloidal.

Para o teste de caso proposto ao novo módulo implementado, que é a fabricação de uma peça que necessita de uma fresadora de quatro eixos para ser feita, o resultado obtido é satisfatório. Para trabalhos futuros, podem ser feitas novas usinagens da peça, a análise do redutor cicloidal e reparametrização do controlador PID.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da Fundamentação Teórica, foi possível obter um maior conhecimento das tecnologias envolvidas no projeto, como os *softwares* LinuxCNC e SprutCAM, além de um melhor entendimento de como módulos de eixo rotativos operam em máquinas CNC. A metodologia escolhida, que foi uma adaptação do método PRODIP, foi suficiente para a execução do trabalho proposto, não sendo necessário adotar outras técnicas ou procedimentos.

Conhecimentos obtidos nas unidades curriculares do curso de Engenharia Mecatrônica, como CNC, CAM, Elementos de Máquina, Engenharia de Precisão, Metrologia, Robótica, Controle de Processos e Acionamentos Eletromecânicos foram de grande importância para o êxito deste trabalho.

Utilizando apenas ferramentas e componentes disponíveis no laboratório LAM do IFSC – Câmpus Florianópolis, um novo módulo de eixo rotativo para a fresadora Denford TRIAC PC foi elaborado. Após a elaboração do projeto e a fabricação dos componentes, foi feita a integração mecatrônica do módulo à fresadora, que consistiu na montagem mecânica, eletroeletrônica e configuração do eixo adicional no controlador LinuxCNC. Também foi realizada a virtualização da fresadora no *software* SprutCAM, essa virtualização possibilitou a programação e a simulação da máquina com o quarto eixo. Por fim, testes de desempenho do protótipo na usinagem de um fuso injetor foram realizados, finalizando assim o cumprimento de todos os objetivos propostos no início do projeto.

Em relação aos resultados deste trabalho, após a análise da peça usinada por meio de ensaios metrológicos, uma das medições, a do passo do fuso, teve um resultado satisfatório, ou seja, muito próximo ao valor projetado; já a medição do raio do filete do fuso se distanciou um pouco do valor de referência. Além do erro de usinagem do raio do filete, que precisa de mais ensaios para determinar a causa, outros pontos de melhoria para trabalhos futuros são uma análise mais avançada do redutor cicloidal e a reparametrização do controlador PID, pois, durante algumas movimentações, esses dois componentes podem ter causado as vibrações inesperadas que ocorreram no conjunto durante a usinagem.

Por fim, cabe dizer que este trabalho agregou grande conhecimento à formação acadêmica do pesquisador, tendo em vista que todo conhecimento aqui

adquirido pode ser aplicado no mercado de trabalho. O módulo desenvolvido obteve um resultado satisfatório para o caso de uso proposto e será de grande utilidade para o IFSC, uma vez que amplia a variedade de peças que poderão ser produzidas na instituição.

REFERÊNCIAS

- APPOLINÁRIO, F. Dicionário de metodologia científica: um guia para a produção do conhecimento científico. São Paulo: Atlas, 2004.
- APRO, Karlo. Secrets of 5-axis machining. New York: Industrial Press, 2008.
- BACK, E. Five-axis milling machine tool kinematics chain design and analysis. Int J Mach Tools Manuf. 2002. No 42. P. 505–520.
- BACK, Nelson et al. Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem. Florianópolis: Manole, 2008. 601 p.
- BARROS, A. J. S. e LEHFELD, N. A. S. Fundamentos de Metodologia: Um Guia para a Iniciação Científica. 2 Ed. São Paulo: Makron Books, 2000.
- BOHEZ, E. Five-axis milling machine tool kinematics chain design and analysis. Int J Mach Tools Manuf. 2002. No 42. P. 505–520.
- BRANCO, Renata. Mecanismo de Acionamento Importante - Redutor de Velocidade Cicloidal, 2013. Disponível em:
<<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/7550-mecanismo-de-acionamento-importante-redutor-de-velocidade-cicloidal>> Acesso em: 01 set. 2017.
- BREAZ, Radu et al. Using serial industrial robots in cnc milling procesess, 2015. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/291336878_Using_Serial_Industrial_Robots_in_CNC_Milling_Procesess> Acesso em: 09 set. 2017.
- CELANI, G.. A Importância Da Pesquisa Na Formação De Docentes: O Caso Da “Informática Aplicada À Arquitetura E Urbanismo”, 2007. 10 f. Notas de Aula. Digitalizada.
- CITISYSTEMS. Servo Motor: Veja como Funciona e Quais os Tipos, 2017. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/servo-motor>> Acesso em: 13 nov. 2017.
- CNC STEP USA. CNC Rotary Table / 4th Axis, 2017. Disponível em:
<<https://www.cncstepusa.com/cnc-rotary-table-4th-axis>> Acesso em: 10 out. 2017.
- CNCCOOKBOOK. G10: Programming Tool and Work Offsets in G-Code, 2017. Disponível em:
<<http://www.cnccookbook.com/CCNCGCodeG10SettingToolWorkOffsetsInGCode.html>> Acesso em: 09 set. 2017.
- COMAC. Conheça mais sobre o SprutCAM, 2017. Disponível em:
<<http://comacbr.com/sprutcaml/>> Acesso em: 06 set. 2017.

CORONEX. CORONEX Cycloidal Reduction Gears and Rotary Index Tables, 2017. Disponível em: <<http://amsmotion.com/coronex-cycloidal-reduction-gears-and-rotary-index-tables/>> Acesso em: 05 set. 2017.

D'AMICO, John. Comparing Cycloidal and Planetary Gearboxes, 2011. Disponível em: <<http://www.machinedesign.com/news/comparing-cycloidal-and-planetary-gearboxes>> Acesso em: 12 set. 2017.

DEMO, P. Pesquisa: princípio científico e educativo. São Paulo: Cortez, 2000

DONG, Zuomin; VICKERS, Geoffrey W.; WANG Yin J. A 3D curvature gouge detection and elimination method for 5-axis CNC milling of curved surfaces. Int J Adv Manuf Technol, 33, 2007.

FERNANDÉZ, A. LACALLE, L.N.L. UGALDE, U.J.. Torno-fresado Ortogonal Como Processo Alternativo Al Torneado A Punta de Cuchilla. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Universidade do País Vasco, 2010.

FERRARESI, D.; RUFFINO, R. T; PALLEROSI, C. A. Usinagem dos metais: Processo de Fresamento. São Paulo: ABM, 1974

FILHO, Flávio de Marco. Redutores de engrenagens, 2017. Disponível em: <http://graduacao.mecanica.ufrj.br/pdf/6_-_Coroa_e_parafuso_sem-fim.pdf> Acesso em: 02 set. 2017.

FRESADORA SANT'ANA. Eixo rosca sem fim - Fresadora Sant'ana, 2017. Disponível em: <<http://www.fresadorasantana.com.br/eixo-rosca-sem-fim.php>> Acesso em: 02 set. 2017.

GERHARDT, T. E. e SILVEIRA, D. T.. Métodos de Pesquisa. 2009. 120 f. Dissertação (Curso de Graduação Tecnológica Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GESSER, Felício J.. Proposta de um sistema de baixo custo para o fresamento em cinco eixos. 2011.

HASCOET, Jean-Yves; RAUCH, Matthieu. Enabling Advanced CNC Programming with openNC Controllers for HSM Machines Tools, 2016. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/hsm.2016.2.issue-1/hsm-2016-0001/hsm-2016-0001.pdf>> Acesso em: 03 set. 2017.

KITAGAWA. Kitagawa RSM100 High Speed Compact NC Rotary Table, 2017. Disponível em: <<https://www.kitagawa.global/en/products/nc-rotary-tables/4th-axis-rotary-tables/rsm100>> Acesso em: 10 out. 2017.

LINUXCNC. LinuxCNC, 2017. Disponível em: <<http://www.linuxcnc.org/>>. Acesso em: 03 set. 2017.

MECAWEB. MecaWeb – Motor de Passo, 2017. Disponível em: <http://mecaweb.com.br/electronica/content/e_motor_passo> Acesso em: 15 nov. 2017.

NABTESCO. NMCE13029 Terminology & Understanding, 2013. Disponível em: <<http://www.nabtescomotioncontrol.com/pdfs/NMCE13029%20Terminology%20and%20Understanding%20Nabtesco>> Acesso em: 12 set. 2017.

NAM, W. K.; OH S. H. A design of speed reducer with trapezoidal tooth profile for robot manipulator. Journal of Mechanical Science and Technology 25, 2011, p. 171-176.

PANASONIC. AC Servo Motor Driver - MINAS S-series: Operating Manual. Japão: Motor Company, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., 2017, 133.

PETRUZELLA, Frank D.. Motores Elétricos e Acionamentos. Porto Alegre: Bookman, 2013. 359 p.

PRECISION TRANSMISSION CHAIN. CNC Machined Components, 2017. Disponível em: <<http://ptchain.net/cnc-machined-components.html>> Acesso em: 12 set. 2017.

PRODANOV, C. C. e FREITAS, E. C.. Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. 277 p.

PROTOPTIMUS. Máquinas CNC: A história do Comando Numérico Computadorizado. 2017. Disponível em: <<http://www.proptimus.com.br/maquinas-cnc-historia-comando-numeric-computadorizado>> Acesso em: 05 out. 2017.

SIEMENS AG. Sinumerik 810D/840D: tool and mold making. Manual. Edition 4, 2004.

SPRUTCAM. SprutCAM - Postprocessors list, 2017. Disponível em: <<https://www.sprutc.com/sprutc-and-solutions/sprutc/postprocessors-list>> Acesso em: 09 set. 2017.

STAROVEŠKI, Tomislav et al. Linuxcnc – the enhanced machine controller: application and an overview, 2013. Disponível em: <<https://hrcak.srce.hr/file/165776>> Acesso em: 03 set. 2017.

TACHIZAWA, T. e MENDES, G. Como fazer monografia na prática. 12 ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006

TAVARES, J. M. R. S.. Referencial, Trajectórias: Introdução ao CNC – II, 09-09 de set. de 2009. 17 f. Notas de Aula. Digitalizada.

TELMAC. Redutores de Velocidade, 2017. Disponível em: <<http://www.telmac.com.br/redutores-de-velocidade.html>> Acesso em: 09 dez. 2017.

TERGOLINA, R. L.. Sensores Industriais: Automação e Controle, 01-28 de fev. de 2018. 53 f. Notas de Aula. Digitalizado.

TORMACH. Rotary and 4-Axis CNC Products | Tormach LLC, 2017. Disponível em: <https://www.tormach.com/product_rotaryproducts.html> Acesso em: 05 set. 2017.

UNIVERSIDADE DE MICHIGAN. Introduction: PID Controller Design, 2017.

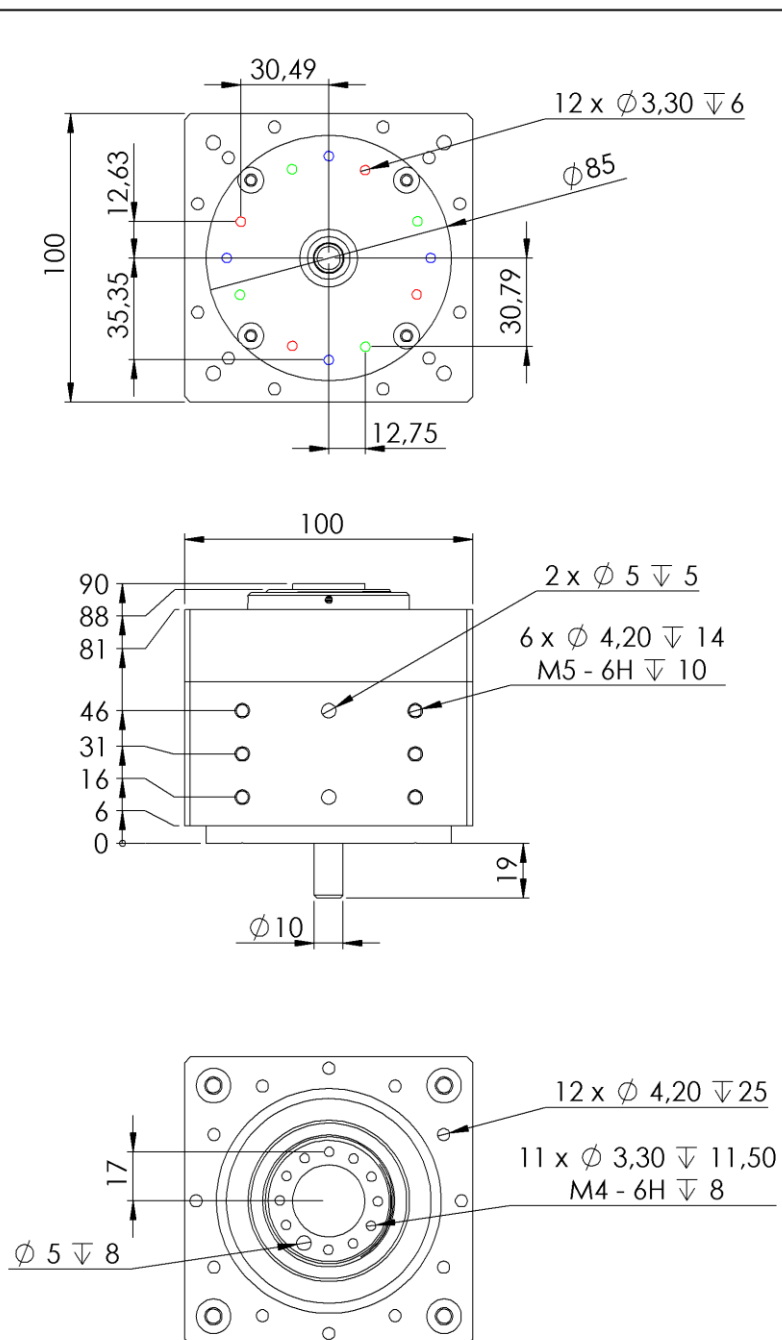
Disponível em:

<<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>> Acesso em: 09 dez. 2017.

VOLPATO, N. Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A - DESENHO TÉCNICO DO REDUTOR CICLOIDAL



Redutor Cicloidal



Nome: Vinicius Ghellere Sbardelotto

Data: 25/09/2017

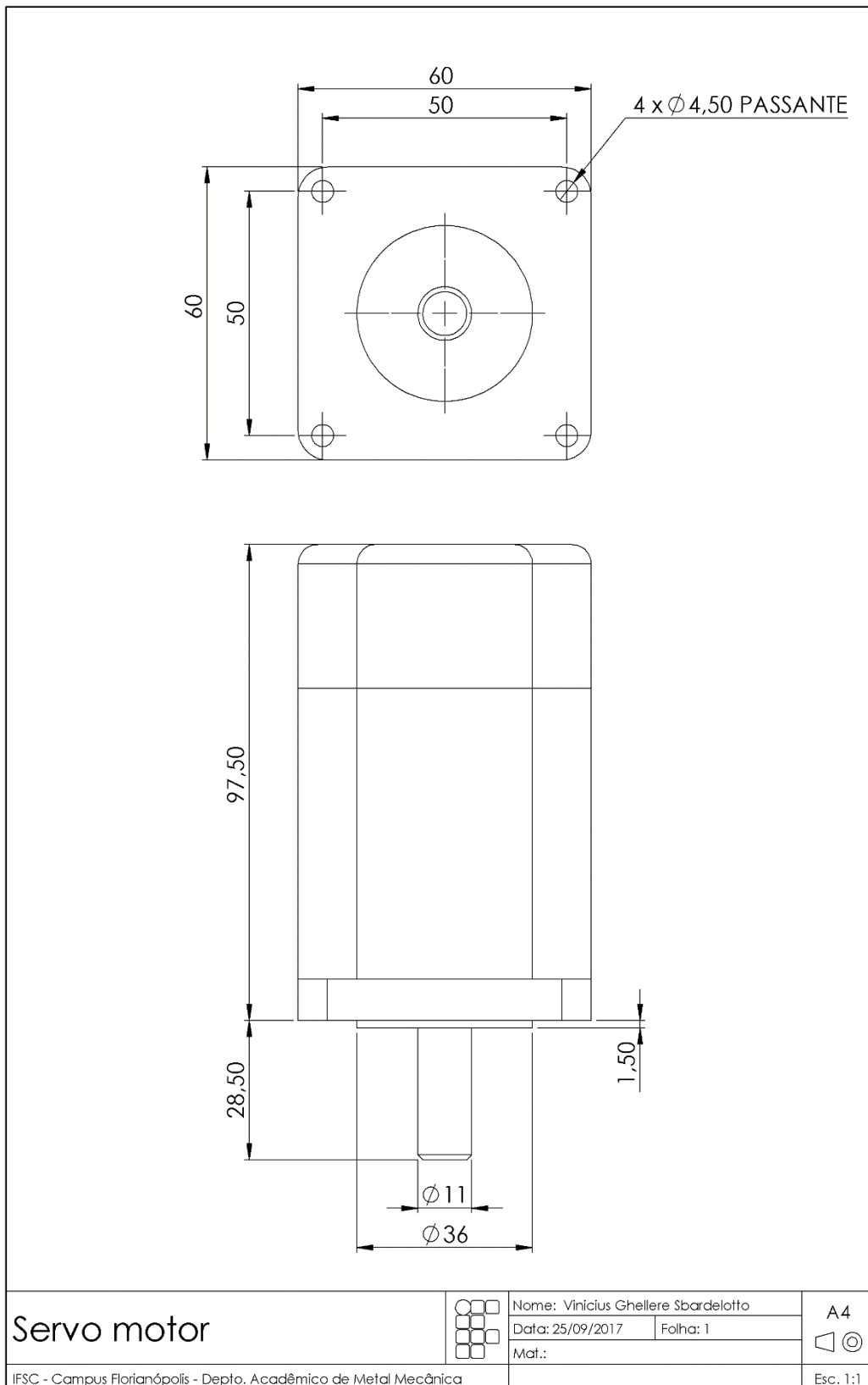
Folha: 1

Mat.:

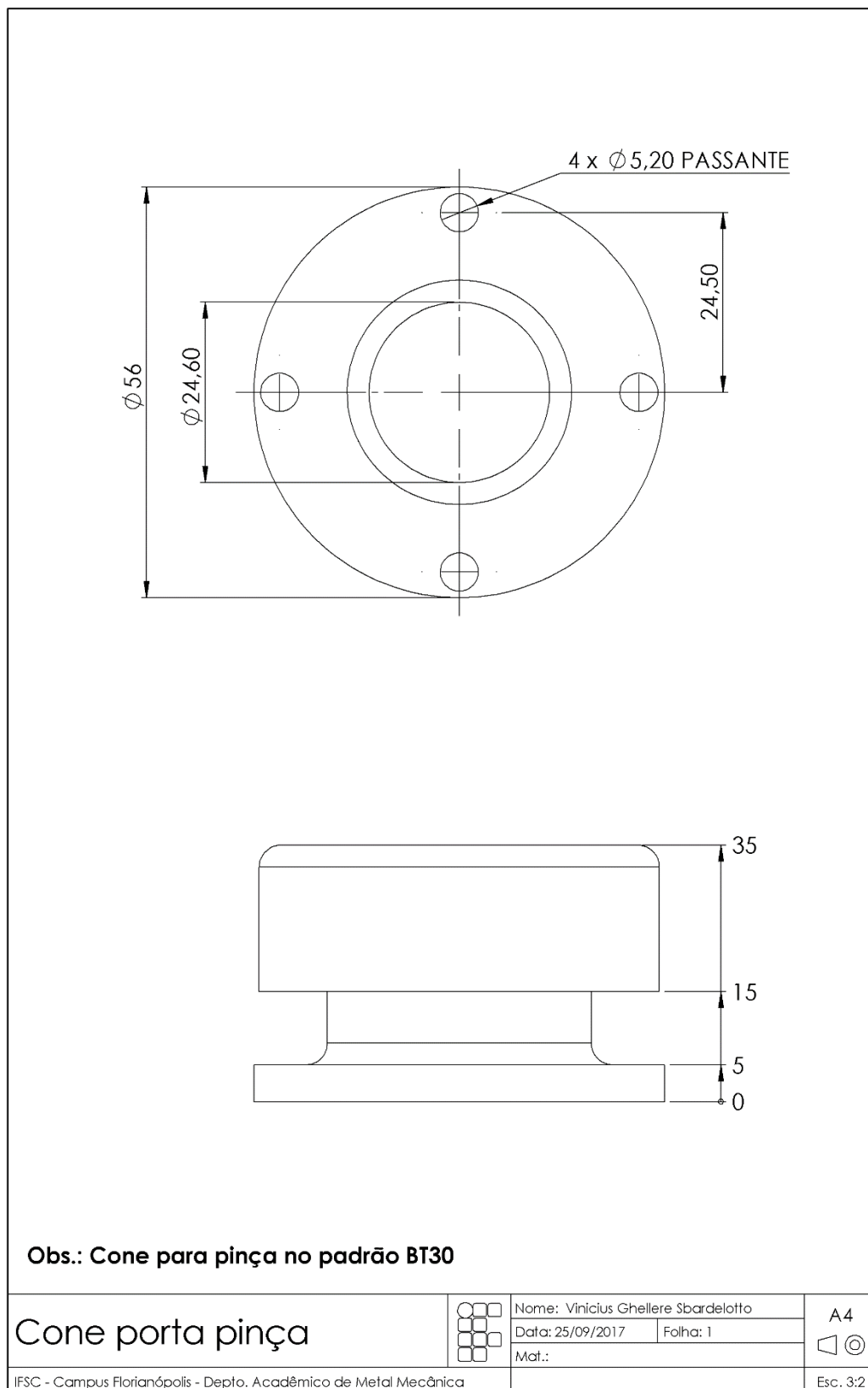
A4



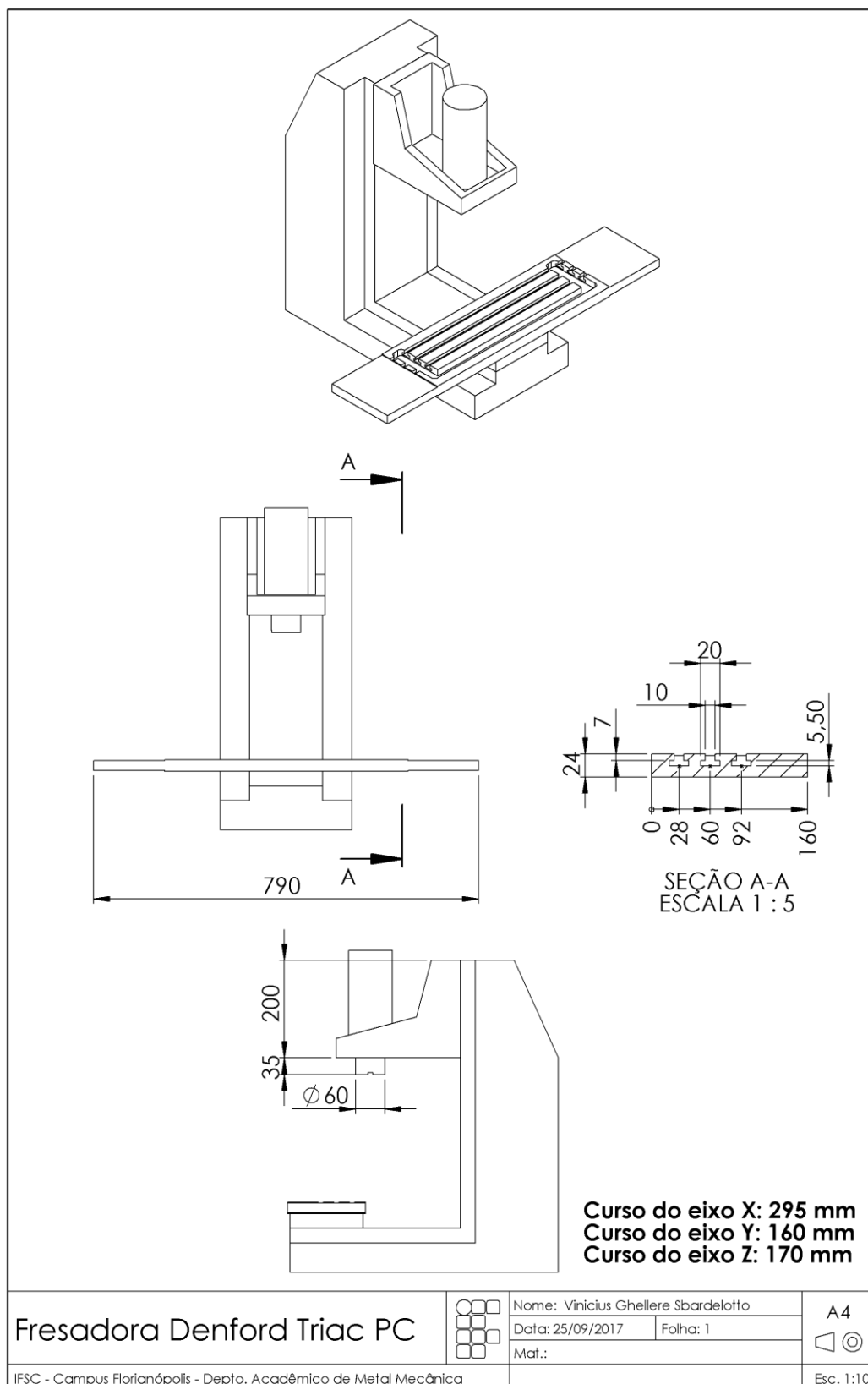
APÊNDICE B - DESENHO TÉCNICO DO SERVO MOTOR



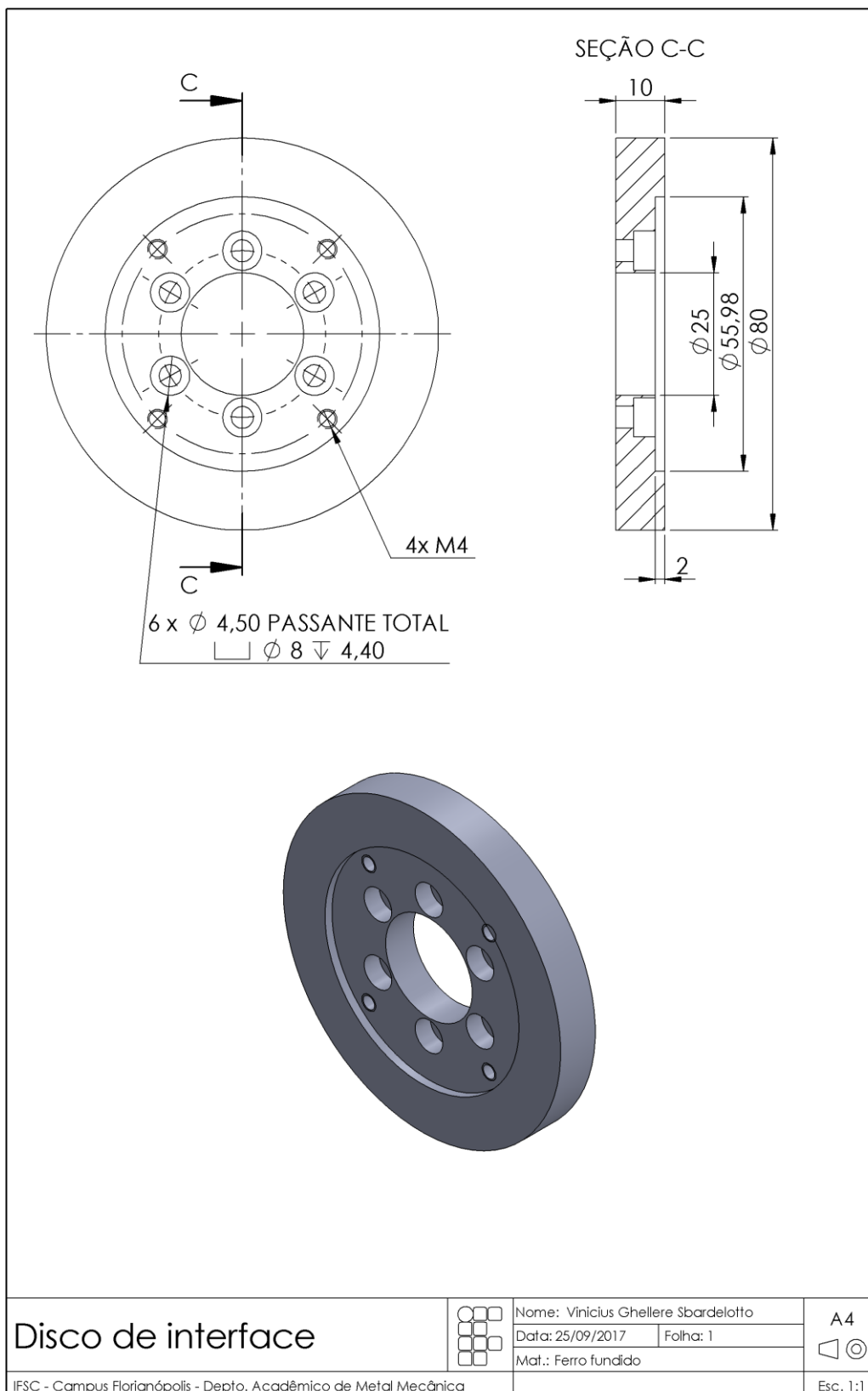
APÊNDICE C - DESENHO TÉCNICO DO CONE PORTA PINÇA



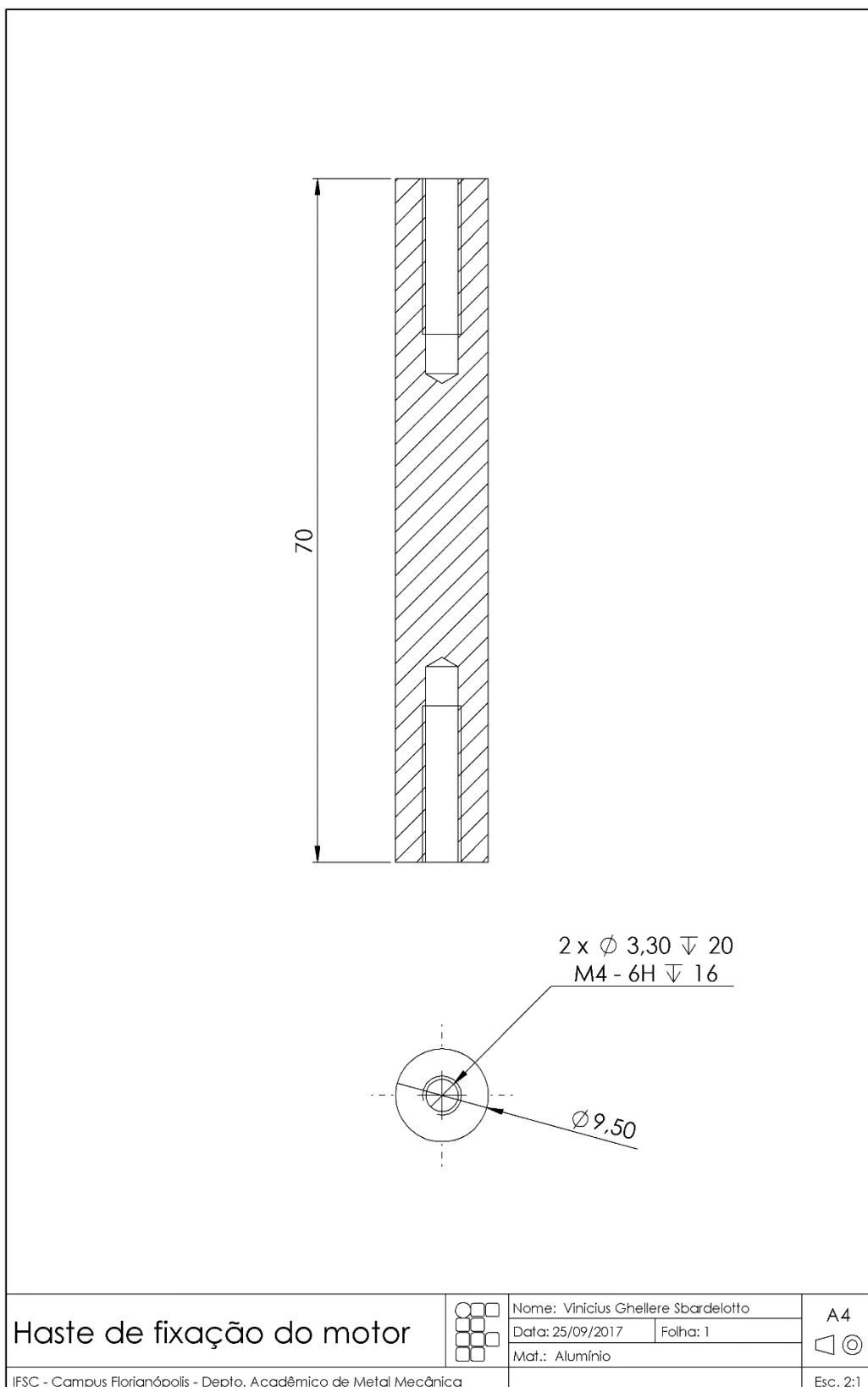
APÊNDICE D - DESENHO TÉCNICO DA FRESADORA DENFORD TRIAC PC



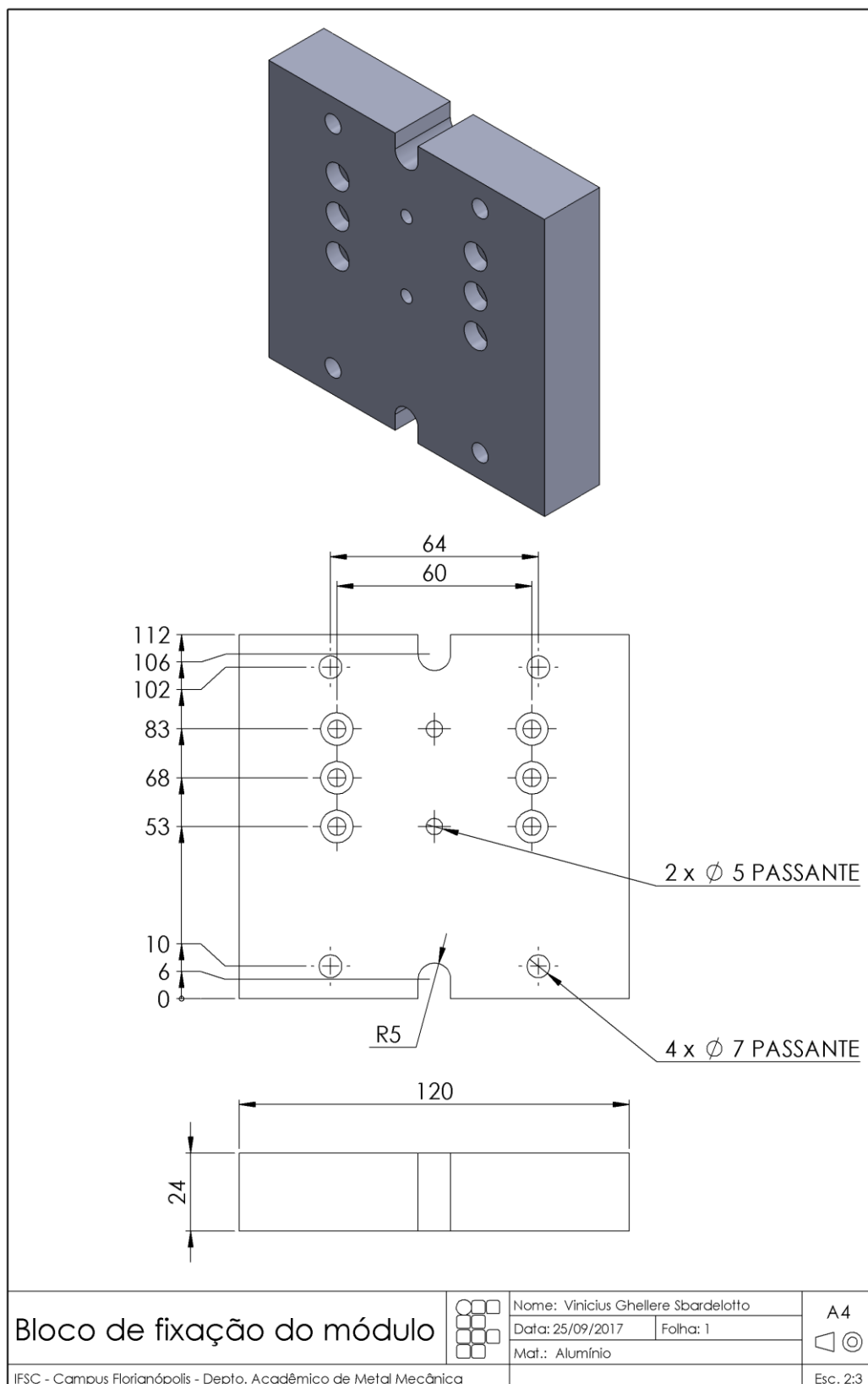
APÊNDICE E - DESENHO TÉCNICO DO DISCO DE INTERFACE



APÊNDICE F - DESENHO TÉCNICO DA HASTE DE FIXAÇÃO DO SERVO MOTOR



APÊNDICE G - DESENHO TÉCNICO DO BLOCO DE FIXAÇÃO DO MÓDULO



APÊNDICE H - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .INI

PARTE 1

```

1 [EMC]
2 MACHINE = Denford
3 DEBUG = 0
4
5 [DISPLAY]
6 DISPLAY = axis
7 POSITION_OFFSET = RELATIVE
8 POSITION_FEEDBACK = ACTUAL
9 MAX_FEED_OVERRIDE = 2.000000
10 MAX_SPINDLE_OVERRIDE = 1.000000
11 MIN_SPINDLE_OVERRIDE = 0.500000
12 INTRO_GRAPHIC = linuxcnc.gif
13 INTRO_TIME = 0.1
14 PROGRAM_PREFIX = /home/feliciano/linuxcnc/hc_files
15 INCREMENTS = 5mm 1mm .5mm .1mm .05mm .01mm .005mm
16 POSITION_OFFSET = RELATIVE
17 POSITION_FEEDBACK = ACTUAL
18 DEFAULT_LINEAR_VELOCITY = 8.333333
19 MAX_LINEAR_VELOCITY = 116.666667
20 MIN_LINEAR_VELOCITY = 0.010000
21 DEFAULT_ANGULAR_VELOCITY = 10.0000
22 MAX_ANGULAR_VELOCITY = 30.000000
23 MIN_ANGULAR_VELOCITY = 0.010000
24 EDITOR = gedit
25 GEOMETRY = xyz
26 GLADEVCP = ./interface.glade
27
28 [FILTER]
29 PROGRAM_EXTENSION = .png,.gif,.jpg Greyscale Depth Image
30 PROGRAM_EXTENSION = .py Python Script
31 png = image-to-gcode
32 gif = image-to-gcode
33 jpg = image-to-gcode
34 py = python
35
36 [TASK]
37 TASK = milltask
38 CYCLE_TIME = 0.010
39
40 [RS27ANGC]
41 PARAMETER_FILE = linuxcnc.var
42
43 [EMCMOT]
44 EMCMOT = motmod
45
46 COMM_TIMEOUT = 1.0
47 COMM_WAIT = 0.010
48 SERVO_PERIOD = 1000000
49
50 [HOSTMOT2]
51 # **** This is for info only ****
52 # DRIVER=hm2_pci
53 # BOARD0=5125
54
55 [HAL]
56 HALUI = halui
57 HALFILE = Denford.hal
58 HALFIE = custom.hal
59 POSTGUI_HALFILE = postgui_call_list.hal
60 SHUTDOWN = shutdown.hal
61
62 [TRAJ]
63 AXES = 4
64 COORDINATES = X Y Z A
65 LINEAR_UNITS = mm
66 ANGULAR_UNITS = degree
67 CYCLE_TIME = 0.010
68 DEFAULT_VELOCITY = 15.00
69 MAX_LINEAR_VELOCITY = 150.00
70
71 [EMCIO]
72 EMCIO = io
73 CYCLE_TIME = 0.100
74 TOOL_TABLE = tool.tbl
75 TOOL_CHANGE_QUILL_UP = 1
76 TOOL_CHANGE_POSITION = -169 -160 0
77
78 *****
79 # Axis X
80 # *****
81
82 [AXIS_0]
83 TYPE = LINEAR
84 HOME = 0.0
85 ERROR = 100.0
86 MIN_ERROR = 0.5
87 MAX_VELOCITY = 150
88 MAX_ACCELERATION = 1500.0
89
89 STEPGEN_MAXVEL = 300
90 STEPGEN_MAXACCEL = 3000
91 P = 100
92 I = 0
93 D = 0
94 FF0 = 0
95 FF1 = 0
96 FF2 = 0
97 BIAS = 0
98 DEADBAND = 0.001
99 MAX_OUTPUT = 100000
100 ENCODER_SCALE = 2000
101 # these are in nanoseconds
102 DIRSTEP = 1000
103 DIRHOLD = 1000
104 STEPLEN = 1000
105 STEPSPACE = 1000
106 STEP_SCALE = -500
107 MIN_LIMIT = -295.0
108 MAX_LIMIT = 0.01
109 HOME_OFFSET = 0.000000
110 HOME_SEARCH_VEL = -16.666667
111 HOME_LATCH_VEL = 0.816667
112 HOME_FINAL_VEL = 0.566667
113 HOME_USE_INDEX = YES
114 HOME_SEQUENCE = 1
115
116 *****
117 # Axis Y
118 # *****
119 [AXIS_1]
120 TYPE = LINEAR
121 HOME = 0.0
122 ERROR = 100.0
123 MIN_ERROR = 0.5
124 MAX_VELOCITY = 150
125 MAX_ACCELERATION = 1500.0
126 STEPGEN_MAXVEL = 300
127 STEPGEN_MAXACCEL = 3000
128 P = 100
129 I = 0
130 D = 0
131 FF0 = 0
132 FF1 = 0

```

APÊNDICE I - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .INI PARTE 2

```

134 BIAS = 0
135 DEADBAND = 0.001
136 MAX_OUTPUT = 100000
137 ENCODER_SCALE = 2000
138 # these are in nanoseconds
139 DIRSETUP = 1000
140 DIRHOLD = 1000
141 STEPLEN = 1000
142 STEPSPACE = 1000
143 STEP_SCALE = -500
144 MIN_LIMIT = -160.0
145 MAX_LIMIT = 0.01
146 HOME_OFFSET = 0.000000
147 HOME_SEARCH_VEL = -16.666667
148 HOME_LATCH_VEL = 0.816667
149 HOME_FINAL_VEL = 0.566667
150 HOME_USE_INDEX = YES
151 HOME_SEQUENCE = 1
152
153 *****
154 # Axis 2
155 *****
156 [AXIS 2]
157 TYPE = LINEAR
158 HOME = 0
159 FERROR = 10.0
160 MIN_FERROR = 0.5
161 MAX_VELOCITY = 80
162 MAX_ACCELERATION = 1500.0
163 STEPGEN_MAXVEL = 104.2
164 STEPGEN_MAXACCEL = 1875
165 P = 80
166 I = 0
167 D = 0
168 FFO = 0
169 FFL = 0
170 FFL2 = 0
171 BIAS = 0
172 DEADBAND = 0.001
173 MAX_OUTPUT = 100000
174 ENCODER_SCALE = 1610
175 # these are in nanoseconds
176 DIRSETUP = 1000
177 DIRHOLD = 1000

178 STEPLEN = 1000
179 STEPSPACE = 1000
180 STEP_SCALE = -500
181 MIN_LIMIT = -170.0
182 MAX_LIMIT = 0.01
183 HOME_OFFSET = 0.000000
184 HOME_SEARCH_VEL = -16.666667
185 HOME_LATCH_VEL = 0.816667
186 HOME_FINAL_VEL = 0.566667
187 HOME_USE_INDEX = YES
188 HOME_SEQUENCE = 0
189
190 *****
191 # Spindle
192 *****
193 [SPINDLE 91]
194 MAX_VELOCITY = 66.666666667
195 MAX_ACCELERATION = 100.0
196 STEPGEN_MAXVEL = 83.3
197 STEPGEN_MAXACCEL = 125.0
198 ENCODER_SCALE = 4000.0
199 # these are in nanoseconds
200 DIRSETUP = 1000
201 DIRHOLD = 1000
202 STEPLEN = 1000
203 STEPSPACE = 1000
204 STEP_SCALE = 100.0
205
206 *****
207 # Axis A
208 *****
209 [AXIS 3]
210 TYPE = ANGULAR
211 FERROR = 5.0
212 MIN_FERROR = 0.1
213 MAX_VELOCITY = 80.0
214 MAX_ACCELERATION = 800.0
215 STEPGEN_MAXVEL = 88.0
216 STEPGEN_MAXACCEL = 880.0
217 # these are in nanoseconds
218 DIRSETUP = 1000
219 DIRHOLD = 1000
220 STEPLEN = 1000
221 STEPSPACE = 1000

222 STEP_SCALE = -2625
223 MIN_LIMIT = -1e99
224 MAX_LIMIT = 1e99
225 HOME_SEARCH_VEL = 50.0
226 HOME_LATCH_VEL = 1.0
227 HOME_USE_INDEX = YES
228 HOME_SEQUENCE = 2

```

APÊNDICE J - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 1

```

1 # Generated by PnCconf at Mon Aug 24 12:26:25 2015
2 # If you make changes to this file, they will be
3 # overwritten when you run PnCconf again
4
5 loadrt tri Vikings
6 loadrt [EMCMOT]EMCMOT servo_period_nsec=[EMCMOT]SERVO_PERIOD num_joints=[TRAJ]AXES
7 loadrt hostmot2
8 loadrt hm2_pci config=" num encoders=6 num_pwmgens=0 num_3pwmgens=0 num_steppgens=5 serial_port_0=000000 "
9 setp hm2_5125.0.watchdog.timeout_ns 10000000
10 loadrt pid_names=pid.x,pid.y,pid.z,pid.s
11 loadrt classicladder_rt numPhysInputs=45 numPhysOutputs=45 numS32In=10 numS32Out=10 numFloatIn=10 numFloatOut=10 numBits=50 numWords=50 numTimers=15
12
13 addf hm2_5125.0.read servo-thread
14 addf motion-command-handler servo-thread
15 addf motion-controller servo-thread
16 addf pid.x.do-pid-calcs servo-thread
17 addf pid.y.do-pid-calcs servo-thread
18 addf pid.z.do-pid-calcs servo-thread
19 addf pid.s.do-pid-calcs servo-thread
20 addf classicladder.0.refresh servo-thread
21 addf hm2_5125.0.write servo-thread
22
23
24 # external output signals
25 # --- ESTOP-OUT ---
26 net estop-out hm2_5125.0.7176.0.3.output-00
27 # --- X-ENABLE ---
28 net x-enable hm2_5125.0.7176.0.3.output-01
29 # external input signals
30 net probe-in <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-25-not
31 # --- ESTOP-EXT ---
32 net estop-ext <= hm2_5125.0.7177.0.0.input-10-not
33 # --- MAX-Z ---
34 net max-z <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-00-not
35 # --- MIN-Z ---
36 net min-z <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-01-not
37 # --- MAX-Y ---
38 net max-y <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-02-not
39 # --- MIN-Y ---
40 net min-y <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-03-not
41 # --- BOTH-X ---
42 net both-x <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-04-not
43 # --- X ---
44 net home-x <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-10

```


APÊNDICE K - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 2

```

45 # --- HOME-Y ---
46 net home-y <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-11
47 # --- HOME-Z ---
48 net home-z <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-12
49 # --- HOME-A ---
50 net home-a <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-13
51
52 # --- General inputs ---
53 net input-05 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-05
54 net input-06 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-06
55 net input-07 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-07
56 net input-08 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-08
57 net input-09 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-09
58 #net input-13 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-13
59 #net input-14 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-14
60 #net input-15 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-15
61
62 # 10, 11, 12 e 13 são os sensores de home para x, y, z e a
63
64 net input-16 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-16
65 net input-17 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-17
66 net input-18 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-18
67 net input-19 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-19
68 net input-20 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-20
69 net input-21 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-21
70 net input-22 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-22
71 net input-23 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-23
72 net input-24 <= hm2_5125.0.7176.0.3.input-24
73
74 # --- General outputs ---
75 net output-08 <= hm2_5125.0.7176.0.3.output-08
76 net output-09 <= hm2_5125.0.7176.0.3.output-09
77 net output-10 <= hm2_5125.0.7176.0.3.output-10
78 net output-11 <= hm2_5125.0.7176.0.3.output-11
79 net output-12 <= hm2_5125.0.7176.0.3.output-12
80 #net output-13 <= hm2_5125.0.7176.0.3.output-13
81 net output-14 <= hm2_5125.0.7176.0.3.output-14
82 net output-15 <= hm2_5125.0.7176.0.3.output-15
83
84 #*****
85 # AXIS X
86 #*****
87
90 setp pid.x.Dgain [AXIS_0]P
91 setp pid.x.bias [AXIS_0]BIAS
92 setp pid.x.FF0 [AXIS_0]FF0
93 setp pid.x.FF1 [AXIS_0]FF1
94 setp pid.x.FF2 [AXIS_0]FF2
95 setp pid.x.deadband [AXIS_0]DEADBAND
96 setp pid.x.maxoutput [AXIS_0]MAX_OUTPUT
97
98 net x-index-enable <=> pid.x.index-enable
99 net x-enable => pid.x.enable
100 net x-output => pid.x.output
101 net x-pos-cmd => pid.x.command
102 net x-vel-fb => pid.x.feedback-deriv
103 net x-pos-fb => pid.x.feedback
104
105 # Step Gen signals/setup
106 setp hm2_5125.0.stepgen.03.dirsetup [AXIS_0]DIRSETUP
107 setp hm2_5125.0.stepgen.03.dirhold [AXIS_0]DIRHOLD
108 setp hm2_5125.0.stepgen.03.steps [AXIS_0]STEPS
109 setp hm2_5125.0.stepgen.03.stepspace [AXIS_0]STEPSPACE
110 setp hm2_5125.0.stepgen.03.position-scale [AXIS_0]STEP_SCALE
111 setp hm2_5125.0.stepgen.03.step type 0
112 setp hm2_5125.0.stepgen.03.control-type 1
113 setp hm2_5125.0.stepgen.03.maxaccel [AXIS_0]STEPGEN_MAXACCEL
114 setp hm2_5125.0.stepgen.03.maxvel [AXIS_0]STEPGEN_MAXVEL
115
116 # ---closedloop stepper signals---
117 net x-pos-cmd axis.0.motor-pos-cmd
118 net x-output => hm2_5125.0.stepgen.03.velocity-cmd
119 net x-enable axis.0.amp-enable-out => hm2_5125.0.stepgen.03.enable
120
121 # ---Encoder feedback signals/setup---
122 setp hm2_5125.0.encoder.00.counter-mode 0
123 setp hm2_5125.0.encoder.00.filter 1
124 setp hm2_5125.0.encoder.00.index-invert 0
125 setp hm2_5125.0.encoder.00.index-mask 0
126 setp hm2_5125.0.encoder.00.index-mask-invert 0
127 setp hm2_5125.0.encoder.00.scale [AXIS_0]ENCODER_SCALE
128
129 net x-pos-fb <= hm2_5125.0.encoder.00.position
130 net x-vel-fb <= hm2_5125.0.encoder.00.velocity

```

APÊNDICE L - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL

PARTE 3

```

131 net x-pos-fb => axis.0.motor-pos-fb
132 net x-index-enable axis.0.index-enable <=> hm2_5125.0.encoder.00.index-enable
133 net x-pos-rawcounts =<=> hm2_5125.0.encoder.00.rawcounts
134
135 #---setup home / limit switch signals---
136 net home-x => axis.0.home-sw-in
137 net both-x => axis.0.neg-lim-sw-in
138 net both-x => axis.0.pos-lim-sw-in
139
140 #*****
141 # AXIS Y
142 #*****
143 setp pid.y.fgain [AXIS_1]P
144 setp pid.y.igain [AXIS_1]I
145 setp pid.y.dgain [AXIS_1]D
146 setp pid.y.bias [AXIS_1]BIAS
147 setp pid.y.fpo [AXIS_1]FPO
148 setp pid.y.fpl [AXIS_1]FPL
149 setp pid.y.fpz [AXIS_1]FPZ
150 setp pid.y.deadband [AXIS_1]DEADBAND
151 setp pid.y.maxoutput [AXIS_1]MAX_OUTPUT
152
153 net y-index-enable <=> pid.y.index-enable
154 net y-enable => pid.y.enable
155 net y-output => pid.y.output
156 net y-pos-cmd => pid.y.command
157 net y-vel-fb => pid.y.feedback-deriv
158 net y-pos-fb => pid.y.feedback
159
160 # Step Gen signals/setup
161 setp hm2_5125.0.stepgen.02.dirsetup [AXIS_1]DIRSETUP
162 setp hm2_5125.0.stepgen.02.dirhold [AXIS_1]DIRHOLD
163 setp hm2_5125.0.stepgen.02.dirpld [AXIS_1]DIRPLD
164 setp hm2_5125.0.stepgen.02.stepspace [AXIS_1]STEPSPACE
165 setp hm2_5125.0.stepgen.02.position-scale [AXIS_1]STEP_SCALE
166 setp hm2_5125.0.stepgen.02.step_type 0
167 setp hm2_5125.0.stepgen.02.control_type 1 [AXIS_1]STEPGEN_MAXACCEL
168 setp hm2_5125.0.stepgen.02.maxaccel [AXIS_1]STEPGEN_MAXVEL
169 setp hm2_5125.0.stepgen.02.maxvel
170
171 #---closedloop stepper signals---
172 net y-pos-cmd axis.1.motor-pos-cmd => hm2_5125.0.stepgen.02.velocity-cmd
173 net y-output => hm2_5125.0.stepgen.02.velocity-cmd
174
175 net y-enable axis.1.amp-enable-out => hm2_5125.0.stepgen.02.enable
176
177 #---Encoder feedback signals/setup---
178 setp hm2_5125.0.encoder.01.counter-mode 0
179 setp hm2_5125.0.encoder.01.filter 1
180 setp hm2_5125.0.encoder.01.index-invert 0
181 setp hm2_5125.0.encoder.01.index-mask 0
182 setp hm2_5125.0.encoder.01.index-mask-invert 0
183 setp hm2_5125.0.encoder.01.scale [AXIS_1]ENCODER_SCALE
184
185 net y-pos-fb <=> hm2_5125.0.encoder.01.position
186 net y-vel-fb <=> hm2_5125.0.encoder.01.velocity
187 net y-pos-cmd => axis.1.motor-pos-fb
188 net y-index-enable axis.1.index-enable <=> hm2_5125.0.encoder.01.index-enable
189 net y-pos-rawcounts <=> hm2_5125.0.encoder.01.rawcounts
190
191 #---setup home / limit switch signals---
192 net home-y => axis.1.home-sw-in
193 net min-y => axis.1.neg-lim-sw-in
194 net max-y => axis.1.pos-lim-sw-in
195
196 #*****
197 # AXIS Z
198 #*****
199 setp pid.z.fgain [AXIS_2]P
200 setp pid.z.igain [AXIS_2]I
201 setp pid.z.dgain [AXIS_2]D
202 setp pid.z.bias [AXIS_2]BIAS
203 setp pid.z.fpo [AXIS_2]FPO
204 setp pid.z.fpl [AXIS_2]FPL
205 setp pid.z.fpz [AXIS_2]FPZ
206 setp pid.z.deadband [AXIS_2]DEADBAND
207 setp pid.z.maxoutput [AXIS_2]MAX_OUTPUT
208
209 net z-index-enable <=> pid.z.index-enable
210 net z-enable => pid.z.enable
211 net z-output => pid.z.output
212 net z-pos-cmd => pid.z.command
213 net z-vel-fb => pid.z.feedback-deriv
214 net z-pos-fb => pid.z.feedback
215
216 # Step Gen signals/setup
217 setp hm2_5125.0.stepgen.01.dirsetup [AXIS_2]DIRSETUP

```

APÊNDICE M - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 4

```

217 setp hm2_5125.0.steppen.01.dirhold [AXIS_2]DIRRHOLD
218 setp hm2_5125.0.steppen.01.steplen [AXIS_2]STEPLEN
219 setp hm2_5125.0.steppen.01.steplen [AXIS_2]STEPSPACE
220 setp hm2_5125.0.steppen.01.position-scale [AXIS_2]STEP_SCALE
221 setp hm2_5125.0.steppen.01.step_type 0
222 setp hm2_5125.0.steppen.01.control-type 1
223 setp hm2_5125.0.steppen.01.maxaccel [AXIS_2]STEPGEN_MAXACCEL
224 setp hm2_5125.0.steppen.01.maxvel [AXIS_2]STEPGEN_MAXVEL
225
226 #---closedloop stepper signals---
227 net z-pos-cmd axis.2.motor-pos-cmd => hm2_5125.0.steppen.01.velocity-cmd
228 net z-output axis.2.motor-pos-cmd
229 net z-enable axis.2.amp-enable-out => hm2_5125.0.steppen.01.enable
230
231 #---Encoder feedback signals/setup---
232 setp hm2_5125.0.encoder.02.counter-mode 0
233 setp hm2_5125.0.encoder.02.filter 1
234 setp hm2_5125.0.encoder.02.index-invert 0
235 setp hm2_5125.0.encoder.02.index-mask 0
236 setp hm2_5125.0.encoder.02.index-mask-invert 0
237 setp hm2_5125.0.encoder.02.scale [AXIS_2]ENCODER_SCALE
238
239 net z-pos-fb <= hm2_5125.0.encoder.02.position
240 net z-vel-fb <= hm2_5125.0.encoder.02.velocity
241 net z-pos-fb => axis.2.motor-pos-fb
242 net z-index-enable axis.2.index-enable <=> hm2_5125.0.encoder.02.index-enable
243 net z-pos-rawcounts <= hm2_5125.0.encoder.02.rawcounts
244
245 #---setup home / limit switch signals---
246 net home-z => axis.2.home-sw-in
247 net min-z => axis.2.neg-lim-sw-in
248 net max-z => axis.2.pos-lim-sw-in
249
250 #*****
251 # AXIS A
252 #*****
253 net a-enable axis.3.amp-enable-out => hm2_5125.0.steppen.04.enable
254
255 #---setup home / limit switch signals---
256 net home-a => axis.3.home-sw-in
257
258 # position command and feedback
259 net emcmot.03.pos-cmd <= axis.3.motor-pos-cmd
300
301
302 net emcmot.03.pos-cmd => hm2_5125.0.steppen.04.position-cmd
260
261 net motor.03.pos-fb <= hm2_5125.0.steppen.04.position-fb
262
263 net motor.03.pos-fb => axis.3.motor-pos-fb
264
265 # Step Gen signals/setup
266 setp hm2_5125.0.steppen.04.dirsetup [AXIS_3]DIRSETUP
267 setp hm2_5125.0.steppen.04.dirhold [AXIS_3]DIRHOLD
268 setp hm2_5125.0.steppen.04.steplen [AXIS_3]STEPLEN
269 setp hm2_5125.0.steppen.04.stepspace [AXIS_3]STEPSPACE
270 setp hm2_5125.0.steppen.04.position-scale [AXIS_3]STEP_SCALE
271 setp hm2_5125.0.steppen.04.step_type 0
272 setp hm2_5125.0.steppen.04.maxaccel [AXIS_3]STEPGEN_MAXACCEL
273 setp hm2_5125.0.steppen.04.maxvel [AXIS_3]STEPGEN_MAXVEL
274
275 #*****
276 # SPINDLE S
277 #*****
278 # Step Gen signals/setup
279 setp hm2_5125.0.steppen.00.dirsetup [SPINDLE_9]DIRSETUP
280 setp hm2_5125.0.steppen.00.dirhold [SPINDLE_9]DIRHOLD
281 setp hm2_5125.0.steppen.00.steplen [SPINDLE_9]STEPLEN
282 setp hm2_5125.0.steppen.00.stepspace [SPINDLE_9]STEPSPACE
283 setp hm2_5125.0.steppen.00.position-scale [SPINDLE_9]STEP_SCALE
284 setp hm2_5125.0.steppen.00.step_type 0
285 setp hm2_5125.0.steppen.00.control-type 1
286 setp hm2_5125.0.steppen.00.maxaccel [SPINDLE_9]MAX_ACCELERATION
287 setp hm2_5125.0.steppen.00.maxvel [SPINDLE_9]MAX_VELOCITY
288
289 net machine-is-enabled => hm2_5125.0.steppen.00.enable
290 net spindle-vel-cmd-tps => hm2_5125.0.steppen.00.velocity-cmd
291
292 #---Encoder feedback signals/setup---
293 setp hm2_5125.0.encoder.03.counter-mode 0
294 setp hm2_5125.0.encoder.03.filter 1
295 setp hm2_5125.0.encoder.03.index-invert 0
296 setp hm2_5125.0.encoder.03.index-mask 0
297 setp hm2_5125.0.encoder.03.index-mask-invert 0
298 setp hm2_5125.0.encoder.03.index-scale [SPINDLE_9]ENCODER_SCALE
299 setp hm2_5125.0.encoder.03.scale [SPINDLE_9]ENCODER_SCALE
300
301 net spindle-revs <= hm2_5125.0.encoder.03.position
302 net spindle-vel-fb <= hm2_5125.0.encoder.03.velocity
net spindle-index-enable <=> hm2_5125.0.encoder.03.index-enable

```

APÊNDICE N - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL

PARTE 5

```

303 # ---setup spindle control signals---
304 net spindle-vel-cmd-rps <= motion.spindle-speed-out-rps
305 net spindle-vel-cmd-rps-abs <= motion.spindle-speed-out-rps-abs
306 net spindle-vel-cmd-rps-abs <= motion.spindle-speed-out-rps-abs
307 net spindle-vel-cmd <= motion.spindle-speed-out
308 net spindle-vel-cmd-rpm-abs <= motion.spindle-speed-out-abs
309 net spindle-on <= motion.spindle-on
310 net spindle-cw <= motion.spindle-forward
311 net spindle-ccw <= motion.spindle-reverse
312 net spindle-brake <= motion.spindle-brake
313 net spindle-revs <=> motion.spindle-revs
314 net spindle-at-speed <=> motion.spindle-at-speed
315 net spindle-vel-Fb <=> motion.spindle-speed-in
316 net spindle-index-enable <=> motion.spindle-index-enable
317
318 # ---Setup spindle at speed signals---
319 sets spindle-at-speed true
320
321 #*****
322 # connect miscellaneous signals
323 #*****
324
325 # ---HALUI signals---
326 net joint-select-a halui.joint.0.select
327 net x-is-homed halui.joint.0.is-homed
328 net jog-x-pos halui.jog.0.plus
329 net jog-x-neg halui.jog.0.minus
330 net jog-x-analog halui.jog.0.analog
331 net joint-select-b halui.joint.1.select
332 net y-is-homed halui.joint.1.is-homed
333 net jog-y-pos halui.jog.1.plus
334 net jog-y-neg halui.jog.1.minus
335 net jog-y-analog halui.jog.1.analog
336 net joint-select-c halui.joint.2.select
337 net z-is-homed halui.joint.2.is-homed
338 net jog-z-pos halui.jog.2.plus
339 net jog-z-neg halui.jog.2.minus
340 net jog-z-analog halui.jog.2.analog
341 net jog-selected-pos halui.jog.selected.plus
342 net jog-selected-neg halui.jog.selected.minus
343 net spindle-manual-cw halui.spindle.forward
344 net spindle-manual-ccw halui.spindle.reverse
345 net spindle-manual-stop halui.spindle.stop
346 net machine-is-on halui.machine.is-on
347 net jog-speed halui.jog-speed
348 net mdi-mode halui.mdi.is-mdi
349
350 # ---coolant signals---
351 net coolant-mist <= iocoolant.0.coolant-mist
352 net coolant-flood <= iocoolant.0.coolant-flood
353
354 # ---probe signal---
355 net probe-in => motion.probe-input
356
357 # ---motion control signals---
358 net in-position <= motion.in-position
359 net machine-is-enabled <= motion.motion-enabled
360
361 # ---digital in / out signals---
362
363 net input-16 => classicladder.0.in-03
364 net input-17 => classicladder.0.in-04
365 net input-18 => classicladder.0.in-05
366 net input-19 => classicladder.0.in-06
367 net input-20 => classicladder.0.in-07
368 net input-21 => classicladder.0.in-08
369 net input-22 => classicladder.0.in-09
370 net input-23 => classicladder.0.in-10
371 net input-24 => classicladder.0.in-11
372
373 net input-05 <= classicladder.0.in-17
374 net input-06 <= classicladder.0.in-18
375 net input-07 <= classicladder.0.in-19
376 net input-08 <= classicladder.0.in-20
377 net input-09 <= classicladder.0.in-21
378
379 net output-08 <= classicladder.0.out-01
380 net output-09 <= classicladder.0.out-02
381 net output-10 <= classicladder.0.out-03
382 net output-11 <= classicladder.0.out-04
383 net output-12 <= classicladder.0.out-05
384 #net output-13 <= classicladder.0.out-06
385 net output-14 <= classicladder.0.out-07
386 net output-15 <= classicladder.0.out-08
387
388

```

APÊNDICE O - CONTEÚDO DO ARQUIVO DE CONFIGURAÇÃO .HAL PARTE 6

```

387 net output-15      <= classicladder.0.out-08
388
389 # ---estop signals---
390 net estop-out      <= ioccontrol.0.user-enable-out
391
392 # **** Setup for external estop ladder program -START ****
393 net estop-out      => classicladder.0.in-00
394 net estop-ext      => classicladder.0.in-01
395 net estop-strobe   classicladder.0.in-02 <= ioccontrol.0.user-request-enable
396 net estop-outcl   classicladder.0.out-00 => ioccontrol.0.emc-enable-in
397
398 # **** Setup for external estop ladder program -END ****
399 # ---manual tool change signals---
400 loadusr -W hal_manualtoolchange
401 net tool-change ioccontrol.0.tool-change => hal_manualtoolchange.change
402 net tool-changed ioccontrol.0.tool-changed <= hal_manualtoolchange.changed
403 net tool-number ioccontrol.0.tool-prep-number => hal_manualtoolchange.number
404 net tool-prepare-loopback ioccontrol.0.tool-prepare => ioccontrol.0.tool-prepared
405
406 #net tool-change-request ioccontrol.0.tool-change #=> classicladder.0.in-12
407 #net tool-change-confirmed ioccontrol.0.tool-changed #<= classicladder.0.out-09
408 #net tool-number ioccontrol.0.tool-prep-number #=> classicladder.0.s32in-00
409 #net tool-prepare-loopback ioccontrol.0.tool-prepare => ioccontrol.0.tool-prepared
410 net spindle-vel-fb => classicladder.0.floatin-00
411 net spindle-brake => classicladder.0.in-14
412 net z-is-homed => classicladder.0.in-15
413 net coolant-flood => hm2_5i25.0.7176.0.3.output-13
414
415 # Load Classicladder without GUI (can reload LADDER GUI in AXIS GUI
416 loadusr classicladder --nogui custom.clp
417

```

ANEXO

ANEXO A - DIAGRAMA DE CONEXÕES DO SERVO DRIVER PARA OPERAÇÃO EM MODO DE CONTROLE DE POSIÇÃO

