

Jérôme Vergueiro Vonk
Paulo de Negreiros Spinelli
Régis Luiz Guimarães

MANIPULADOR AUTOMÁTICO DE VARREDURA POR ULTRASSOM

São Paulo - SP, Brasil

6 de março de 2012

Jérôme Vergueiro Vonk
Paulo de Negreiros Spinelli
Régis Luiz Guimarães

MANIPULADOR AUTOMÁTICO DE VARREDURA POR ULTRASSOM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientador:
Prof. Dr. Flávio Buiochi

São Paulo - SP, Brasil

6 de março de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Guimarães, Régis Luiz

Manipulador automático de varredura por ultrassom / R.L. Guimarães; P.N. Spinelli; J.V. Vonk. – São Paulo, 2012. 91p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Manipuladores 2.Ultrassom 3.Campo acústico 4.Varredura I.Spinelli, Paulo Nogueiros II.Vonk, Jérôme Vergueiro III. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos IV.t.

“Um inventor é um engenheiro que não
leva a sua educação muito a sério.”

(Charles Kettering)

“O lápis, o esquadro, o papel;
o desenho, o projeto, o número;
o engenheiro pensa o mundo justo,
mundo que nenhum véu encobre...”

(João Cabral de Melo Neto)

Resumo

Uma das aplicações de equipamentos de ultrassom na indústria é em ensaios não destrutivos. Um exemplo disso é a inspeção de peças para comprovar a integridade estrutural do material (i.e., verificar a existência de possíveis falhas visualmente não detectáveis). O aprimoramento das técnicas de inspeção depende do estudo da formação de imagens em B-scan e C-scan, gerados a partir de transdutores de ultrassom. Este trabalho tem como objetivo implementar um sistema automatizado de varredura por ultrassom capaz de deslocar o transdutor ultrassônico e realizar medições tridimensionais de seu campo acústico. Para isso, será projetado um manipulador capaz de executar movimentos em cinco graus de liberdade, sendo três translações e duas rotações. Além disso, serão desenvolvidos o hardware de acionamento do sistema, o software de controle e aquisição dos dados e a interface com o usuário.

Abstract

Ultrasound equipments may be used in the industry for nondestructive testing. An example of such application is the inspection of parts to verify the integrity of a material (i.e., check for visually undetectable defects). The improvement of inspection techniques depends on the study of B-scan and C-scan image forming, which are generated by ultrasonic transducers. This work aims to implement an automated ultrasound scanning able to displace the ultrasonic transducer and to perform three-dimensional measurements of its acoustic field. A positioning system which allows movements along the three translational axes and around two angular axes will be designed. In addition, a hardware to drive system, a software to control the system, a software for data acquisition and a user interface will be developed.

Lista de Figuras

2.1	Desenho esquemático do dispositivo de varredura SCMCA [Adamowski, Buiochi e Matuda 1995].	p. 16
2.2	Vista em perspectiva do manipulador.	p. 17
2.3	Conjunto de rotação do manipulador.	p. 18
2.4	Sistema de aquisição DAEDAL do laboratório BRL.	p. 19
2.5	Tanque de imersão de cinco eixos da fabricante Marietta NDT [MARIETTA NDT 2012].	p. 20
2.6	Tanque de imersão de três eixos da GE-MCS [GE-MCS 2012].	p. 21
3.1	Diagrama dos componentes do sistema para medição com ultrassom. . .	p. 22
3.2	Configuração em pórtico móvel.	p. 24
3.3	Configuração em “C” com mesa fixa.	p. 25
3.4	Configuração em “C” com mesa móvel.	p. 25
3.5	Guia linear cilíndrica [OBR Equipamentos Industriais Ltda 2012]. . . .	p. 30
3.6	Guia linear de rolamento [Manutenção e Suprimentos 2012].	p. 30
3.7	Modelo de acoplamento de fole [FreioMix 2012].	p. 32
4.1	Primeiro modo de vibrar para a estrutura da máquina.	p. 36
4.2	Primeiro modo de vibrar para a máquina completa.	p. 37
4.3	Tensões de Von Mises na estrutura da máquina.	p. 38
4.4	Deslocamentos na estrutura da máquina.	p. 38
4.5	Direções do momento fletor no bloco deslizante [Hiwin 2008].	p. 39
4.6	Fuso de esferas recirculantes, com castanha em corte [Mec Parts 2012].	p. 42
4.7	Esquema de fixação do fuso com mancais e rolamentos [Hiwin 2010]. . .	p. 43

4.8	Detalhe da extremidade fixa dos fusos projetados [Tink Roll 2011].	p. 44
4.9	Vista em corte da seção do mancal fixo.	p. 44
4.10	Detalhe da extremidade suportada dos fusos projetados [Tink Roll 2011].	p. 47
4.11	Vista em corte da seção do mancal suportado.	p. 47
4.12	Conjunto coroa e sem-fim [USIWAL Indústria mecânica 2012].	p. 51
4.13	Drive de acionamento utilizado no projeto.	p. 57
4.14	Diagrama UML de casos de uso.	p. 61
4.15	Diagrama de estados do software.	p. 62
4.16	Diagrama UML de classes do software.	p. 64
4.17	wxJogPage.	p. 66
4.18	wxTrajPage.	p. 67
4.19	wxGraph.	p. 67
4.20	wxConnPage.	p. 68
4.21	wxPlayPage.	p. 68
4.22	Exemplo de arquivo de configuração.	p. 70
4.23	Diagrama de blocos do projeto.	p. 71
5.1	Ilustração do manipulador em perspectiva.	p. 73
5.2	Detalhes do conjunto giratório.	p. 74
5.3	Interior do gabinete do hardware.	p. 75
5.4	Exterior do gabinete.	p. 75
5.5	Janela wxTrajPage do software.	p. 76
5.6	Manipulador em fase final de construção.	p. 77

Lista de Tabelas

4.1	Propriedades dos materiais candidatos à composição da máquina. . . .	p. 36
4.2	Fatores de escolha de diâmetros e passos dos fusos.	p. 41
4.3	Dimensões para a extremidade fixa dos fusos.	p. 45
4.4	Dados dos rolamentos selecionados para os mancais fixos [SKF 2012]. .	p. 45
4.5	Dimensões para a extremidade suportada dos fusos.	p. 48
4.6	Dados dos rolamentos selecionados para os mancais suportados [SKF 2012].	p. 48
4.7	Requisitos para seleção dos acoplamentos.	p. 52
4.8	Propriedades dos motores de passo.	p. 56
5.1	Características do equipamento.	p. 77

Sumário

1	Introdução	p. 12
1.1	Varredura por ultrassom	p. 12
1.2	Objetivos	p. 13
1.3	Justificativa	p. 14
2	Estado da Arte	p. 15
2.1	Sistema computadorizado para medição de campos acústicos	p. 15
2.2	Manipulador presente na Escola Politécnica da USP	p. 16
2.3	Visita ao laboratório BRL, nos Estados Unidos da América	p. 18
2.4	Equipamentos comerciais	p. 19
3	Projeto Conceitual	p. 22
3.1	Introdução	p. 22
3.2	Análise das necessidades e requisitos	p. 23
3.3	Levantamento e escolha de soluções	p. 24
3.3.1	Quanto à estrutura da máquina	p. 24
3.3.1.1	Critério de ponderação	p. 26
3.3.1.2	Discussão e escolha da solução	p. 26
3.3.2	Quanto ao acionamento	p. 27
3.3.3	Quanto à transmissão	p. 28
3.3.3.1	Translação	p. 28
3.3.4	Quanto ao acoplamento	p. 32

3.3.5	Quanto ao software	p. 33
4	Projeto Executivo	p. 35
4.1	Introdução	p. 35
4.2	Subsistema mecânico	p. 35
4.2.1	Estrutura	p. 35
4.2.1.1	Materiais	p. 35
4.2.1.2	Análise de frequência	p. 36
4.2.1.3	Análise dinâmica	p. 37
4.2.2	Projeto da transmissão	p. 38
4.2.2.1	Translação	p. 38
4.2.2.2	Rotação	p. 49
4.2.3	Acoplamento	p. 52
4.2.4	Projeto de peças	p. 53
4.3	Subsistema eletrônico	p. 55
4.3.1	Dimensionamento dos motores	p. 55
4.3.2	Acionamento dos motores de passo e resolução do sistema . . .	p. 56
4.3.3	Circuito	p. 57
4.3.4	Gabinete do hardware	p. 57
4.4	Subsistema de software	p. 58
4.4.1	Interface com o usuário	p. 59
4.4.1.1	Especificações do projeto	p. 59
4.4.1.2	Busca por soluções	p. 62
4.4.1.3	Aprofundamento do modelo escolhido	p. 63
4.4.1.4	Programação	p. 69
4.4.1.5	Testes	p. 70
4.4.2	Integração	p. 71

4.4.2.1	Aquisição	p. 72
4.4.2.2	Sincronização	p. 72
5	Resultados	p. 73
5.1	Sistema mecânico	p. 73
5.2	Sistema eletrônico	p. 74
5.3	Sistema de software	p. 76
5.4	Integração e objetivos alcançados	p. 76
6	Conclusões	p. 79
6.1	Conclusões	p. 79
	Referências	p. 81
	Apêndice A – Desenhos	p. 84
A.1	Desenhos	p. 84

1 *Introdução*

1.1 Varredura por ultrassom

A utilização de equipamentos automáticos de inspeção por ultrassom destaca-se no meio industrial como ferramenta para comprovar a integridade estrutural de materiais em inspeções não destrutivas e de baixo custo.

No meio acadêmico, o mesmo equipamento pode ser usado em tanques de imersão, no estudo de aplicações envolvendo formação de imagens, ensaios não-destrutivos e medições tridimensionais da distribuição de pressão de campos acústicos [Buiochi 2010], produzidos por transdutores de ultrassom.

A técnica baseia-se no emprego de cerâmica piezelétrica que, quando excitada, vibra a uma frequência previamente conhecida, gerando ondas ultrassônicas. Existem dois métodos de captura do sinal: modo *pulso-eco*, em que o próprio transdutor emissor captura as ondas refletidas pela peça examinada e modo *transmissão e recepção*, em que há um transdutor independente para a recepção da onda ultrassônica.

Um exemplo de aplicação é a caracterização de transdutores, através do levantamento de campos acústicos utilizando-se hidrofones pontuais (diâmetro entre 0,2 a 2 milímetros). O hidrofone é posicionado de frente ao transdutor e através do sistema de movimentação podem ser efetuadas medidas em um único ponto, ao longo de uma linha (como o eixo acústico, por exemplo), ou por todo um plano à frente do transdutor. Com esses dados, obtêm-se informações sobre o campo acústico do transdutor que caracterizam seu comportamento [Albuquerque et al. 2004].

Outro exemplo é a inspeção por ultrassom [Buiochi et al. 2011], baseada no modo pulso-eco. O transdutor é separado da peça de teste por um meio de acoplamento (como óleo, graxa ou gel) ou por água, em um teste de imersão. O sinal adquirido representa as formas de ondas ultrassônicas refletidas que vêm das interfaces, como das paredes da peça de teste, ou de falhas no interior do objeto. A envoltória do sinal retificado pode

ser apresentada em função do tempo (ou distância), constituindo um *A-scan* (onde “A” se refere à amplitude).

Uma imagem ultrassônica em duas dimensões pode ser formada pela coleção de sinais *A-scan* obtidos ao se deslocar o transdutor. Os dados gravados podem ser visualizados como um corte transversal da peça, com cada ponto correspondendo a uma posição do transdutor ultrassônico. O brilho do pixel em cada traço da imagem é proporcional à amplitude do sinal recebido. Essa imagem é chamada de *B-scan* (onde “B” denota brilho).

Outro tipo de imagem, conhecido como *C-scan*, pode também ser obtida pelo movimento de um transdutor em um padrão matricial ao longo da superfície da peça de teste. Cada *A-scan* aquisitado é avaliado em uma determinada janela temporal e o resultado é plotado. A imagem obtida é a representação dos defeitos sobre a área analisada.

Visto que o princípio dos procedimentos descritos envolve a análise de cada ponto de uma malha definida sobre o material, torna-se necessária a presença de um mecanismo automático que seja capaz de varrer toda superfície com precisão e repetibilidade suficientes para garantir uma ação consistente e rápida. Também é essencial ao sistema possuir um bloco responsável por aquiritar os sinais recebidos pelo transdutor e manipulá-los para que forneçam as informações necessárias.

1.2 Objetivos

Consideradas as principais aplicações dos equipamentos de ultrassom na indústria e na academia, o presente trabalho tem como objetivos:

- Construir um dispositivo mecânico capaz de executar movimentos de precisão em cinco graus de liberdade, sendo três translações e duas rotações;
- Especificar o hardware eletrônico de acionamento do mecanismo, montando os circuitos lógicos e de potência necessários para alimentar e comandar os atuadores;
- Implementar um software de controle, capaz de movimentar automaticamente os atuadores;
- Possibilitar ao operador, através de uma interface homem-máquina (IHM), operações como movimentação por coordenadas absolutas e relativas, planejamento de trajetórias e aquisição de dados gerados pelos transdutores de ultrassom.

Através do desenvolvimento dos tópicos supracitados, pretende-se que a máquina possa realizar as seguintes tarefas de interesse da pesquisa acadêmica:

- Verificar o campo acústico gerado por transdutores de ultrassom;
- Obter propriedades de materiais através de inspeção por ultrassom;
- Servir como ferramenta de estudo para aplicações que envolvam a formação de imagens.

1.3 Justificativa

O Laboratório de Ultrassom do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da USP desenvolve estudos relacionados à aplicação de ultrassom na área industrial. O mapeamento do campo acústico dos transdutores ultrassônicos desenvolvidos no próprio laboratório, bem como dos transdutores comerciais adquiridos para pesquisas, é realizado no tanque acústico disponível no laboratório. Este mapeamento requer um controle preciso do posicionamento do transdutor com relação ao hidrofone, o qual é usado para a medição do campo de pressão gerado pelo transdutor em questão.

O laboratório vem desenvolvendo sistemas de posicionamento desde a década de 1990. Desde então, novos conceitos vêm sendo propostos para o problema. Baseando-se em experiências anteriores de manipuladores desenvolvidos pelo laboratório, este trabalho visa a proposição de um novo manipulador. Do ponto de vista mecânico, são apresentadas novas soluções para a estrutura da máquina e para a movimentação dos eixos de rotação. A comunicação entre os microcomputadores componentes do sistema e a interface com o usuário foram totalmente reformuladas. Para isso, foram usados novos conceitos que dependem menos da interação com o usuário, proporcionando um uso mais eficiente e rápido.

Após o término do projeto, o protótipo construído servirá como ferramenta de pesquisa no laboratório, dando continuidade às pesquisas na área de desenvolvimento de transdutores de ultrassom e de técnicas avançadas de ensaios não destrutivos por ultrassom [Buiocchi 2010][Santos 2010].

2 *Estado da Arte*

2.1 Sistema computadorizado para medição de campos acústicos

No ano de 1995, foi publicado no Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos (CONAEND), por professores da Escola Politécnica da USP, um artigo que apresentava um sistema computadorizado para medição de campos acústicos (SCMCA) produzidos por transdutores de ultrassom. Além dessa funcionalidade, o sistema objetivava o estudo de aplicações envolvendo formação de imagens *B-scan* e *C-scan* e ensaios não destrutivos em tanques de imersão.

O SCMCA foi proposto com movimentação automática em três eixos cartesianos e movimentação manual em dois eixos de rotação. Funcionava tanto no modo pulso-eco como no modo transmissão-recepção; para isso, contava com um segundo dispositivo mecânico, com os mesmos graus de liberdade, para o posicionamento de hidrofones. Estes são caracterizados como receptores piezelétricos pequenos, comparados com os respectivos comprimentos de onda, que funcionam submersos em meios líquidos [Adamowski, Buiocchi e Matuda 1995].

A estrutura mecânica foi montada em aço, com perfis de seção quadrada e uniões soldadas. Cada eixo cartesiano era acionado por motor de passo, com a transmissão do movimento realizada por fuso de esferas recirculantes retificado, com castanhas pré-carregadas para eliminação de folga. A resolução do movimento, para cada eixo, era de 0,005 mm.

O controle do sistema era feito por um microcomputador tipo PC-486 com interfaces IEEE-488 (GPIB), paralela e placa de aquisição de sinais com conversão analógica/digital. A excitação do transdutor era possível através de um gerador de funções ligado a um amplificador de potência.

O software de controle foi desenvolvido em C++ para funcionamento em Windows

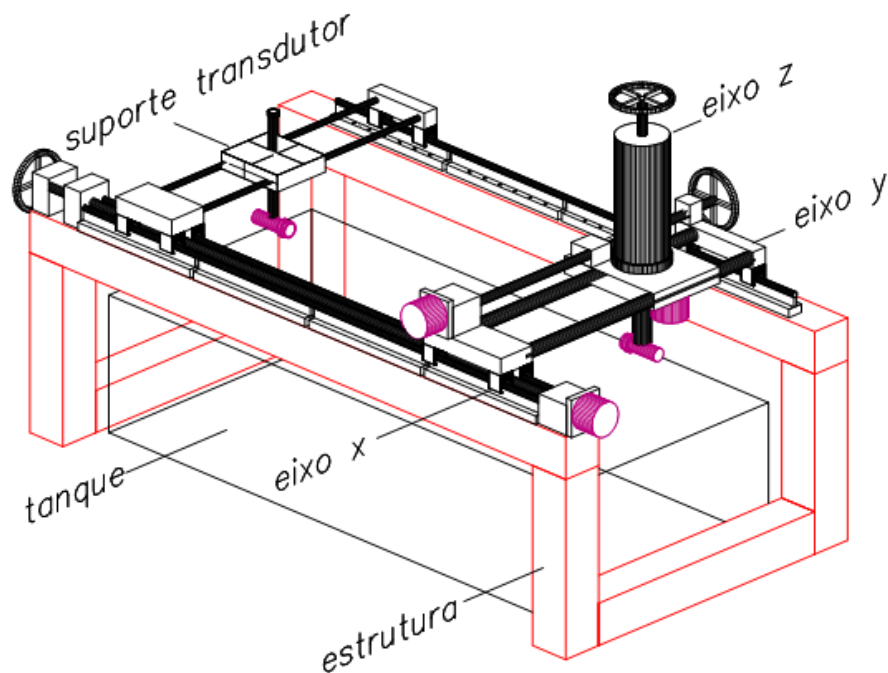


Figura 2.1 – Desenho esquemático do dispositivo de varredura SCMCA [Adamowski, Buiocchi e Matuda 1995].

e permitia ao usuário a programação do movimento automático do dispositivo, possibilitando a varredura em três eixos. A velocidade de movimentação e os limites de operação também eram configuráveis através das janelas do software.

O SCMCA serviu de inspiração para trabalhos futuros, em projetos com aplicações semelhantes que objetivavam diferentes classes de precisão na movimentação do mecanismo.

2.2 Manipulador presente na Escola Politécnica da USP

No biênio 2007/2008 foi projetado por membros do Laboratório de Ultrassom da Escola Politécnica da USP um manipulador de varredura por ultrassom, concebido no projeto Petrobrás/ANP. Hoje, o equipamento encontra-se em operação.

Este manipulador foi proposto com movimentação automática dos seus cinco graus de liberdade, sendo três translações e duas rotações. Sua arquitetura consiste de uma estrutura em 'C' com mesa fixa, transferindo todos os graus de liberdade para o transdutor. Devido ao seu espaço de trabalho de 1 m^3 e à presença de vigas em balanço, o material

escolhido para os pórticos deslizantes foi o alumínio, por ter uma densidade inferior ao aço, que é o componente da estrutura fixa da máquina.



Figura 2.2 – Vista em perspectiva do manipulador.

A solução desse projeto para as juntas prismáticas é a transmissão de movimento por fusos auxiliados por guias. Para as juntas de rotação, foi projetado um sistema baseado em uma peça em formato 'C', que desliza ao longo do eixo vertical. Um primeiro motor de passo permite a rotação do conjunto em torno de seu próprio eixo. Apoiados em mancais de rolamento, um segundo motor de passo e um tubo metálico giram solidários ao movimento de rotação. O movimento deste segundo motor de passo, através de uma correia, é transmitido para o atuador que se encontra situado no fim do tubo metálico. Desta forma, a rotação em forma de “balanço” é obtida com o ponto de apoio ao fim do tubo vertical, de modo que grandes ângulos de rotação podem ser obtidos sem que haja limitação do movimento.

O manipulador objeto deste trabalho tem como proposta ter menores dimensões que o antigo, podendo ser depositado em cima de uma mesa comum e ser deslocado de lugar sem a necessidade de desmontar o equipamento. Quanto ao sistema de software, a interface com o usuário será totalmente reformulada, sendo desenvolvida com o objetivo de que um usuário possa utilizar o sistema sem possuir conhecimentos prévios de linguagem G, utilizada em máquinas de comando numérico. Além disso, diferente dos projetos anteriores, será configurada uma comunicação ethernet entre os dois computadores do dispositivo, para que deixe de ser necessária a transferência manual de informações entre o computador cliente e o servidor.

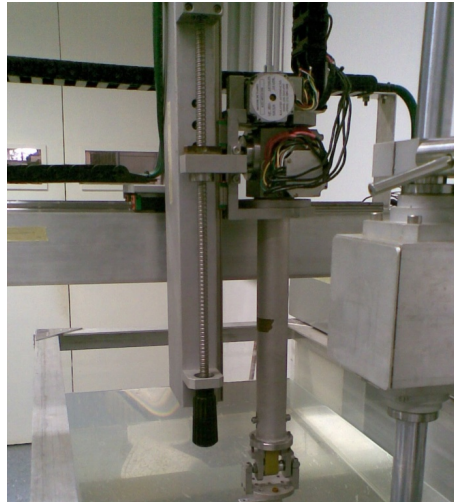


Figura 2.3 – Conjunto de rotação do manipulador.

Há a pretensão de que este novo manipulador substitua o antigo em parte das medições e levantamentos. Além disso, o novo sistema de controle do equipamento, por ser intercambiável, poderá substituir o sistema utilizado atualmente.

2.3 Visita ao laboratório BRL, nos Estados Unidos da América

A inspiração para este novo projeto veio da visita do Prof. Dr. Flávio Buiochi, orientador desta monografia, ao laboratório BRL (Bioacustics Research Lab) da Universidade de Illinois, nos Estados Unidos da América. Neste laboratório, o orientador esteve em contato com alguns manipuladores de varredura lá presentes, como o Sistema de Aquisição DAEDAL [BIOACUSTICS RESEARCH LAB 2012]. Assim, novos conceitos de interface e aquisição de dados, bem como novas soluções para os eixos de rotação da máquina foram assimilados.

Na (Figura 2.4), observa-se um manipulador de cinco graus de liberdade com estrutura em pórtico móvel. Sendo assim, devido ao *princípio do deslocador longo* [Nakazawa 1994, p. 117–130] e dada a dimensão robusta do equipamento, dois dos eixos de translação do mecanismo possuem atuadores em ambos os lados do pórtico, para possibilitar um movimento mais suave.

A solução dos eixos de translação foi obtida a partir de blocos consistidos de guias e fusos. Já para os graus de liberdade de rotação, uma solução mais simples do que as vistas anteriormente foi adotada: há uma longa haste, que contém o transdutor em



Figura 2.4 – Sistema de aquisição DAEDAL do laboratório BRL.

uma ponta, acoplada ao conjunto por meio do aperto de uma manopla. O movimento do motor produz um “balanço” com o ponto de apoio na extremidade superior da haste, produzindo uma ampliação do movimento, isto é: um pequeno deslocamento angular do motor produzirá um grande deslocamento no transdutor.

2.4 Equipamentos comerciais

Atualmente, há uma grande quantidade de empresas que comercializam soluções em ultrassom voltadas principalmente para a indústria. A faixa de preço de equipamentos desse porte é de centenas de milhares de dólares .

Os tanques de imersão pequenos da série IT, da fabricante americana *Marietta NDT* [MARIETTA NDT 2012], são projetados para o teste de peças de até 24” de diâmetro e 20 kg, enquanto a série maior é projetada para trabalhar com o ambiente industrial de cargas pesadas.

Na Figura 2.5, tem-se um exemplo de tanque com arquitetura de mesa fixa. O sistema



Figura 2.5 – Tanque de imersão de cinco eixos da fabricante Marietta NDT [MARIETTA NDT 2012].

utiliza servo-motores e a transmissão do movimento, nos eixos de translação, é feita por fusos de esferas recirculantes. Um diferencial dos manipuladores dessa fabricante é o sistema de ajuste para o tamanho da peça a ser inspecionada, que inclui mecanismos de precisão da ordem de micrômetros para o posicionamento e orientação das peças.

A GE-MCS [GE-MCS 2012], divisão da empresa *General Eletric*, além de possuir uma linha de tanques de imersão três tamanhos padrão, projeta e produz sistemas customizados para necessidades específicas, sejam de indústria ou laboratório. Como exemplo de indústria, pode-se citar a automotiva, aeroespacial, de cerâmicas, compósitos e metalúrgicas. De design mais simples, os sistemas desenvolvidos pela empresa em geral possibilitam movimento automático em três eixos cartesianos para geração de imagens *B-scan* e *C-scan*.



Figura 2.6 – Tanque de imersão de três eixos da GE-MCS [GE-MCS 2012].

3 Projeto Conceitual

3.1 Introdução

Os componentes básicos de um sistema automatizado para medições com ultrassom são:

- Uma estrutura rígida capaz de dar sustentação aos movimentos do mecanismo;
- Um transdutor de ultrassom disposto adequadamente no mecanismo de forma a poder se movimentar;
- Um tanque de imersão;
- Um sistema de hardware dedicado para o acionamento dos atuadores e seu controle;
- Um sistema eficiente de aquisição de dados e interface com o usuário.

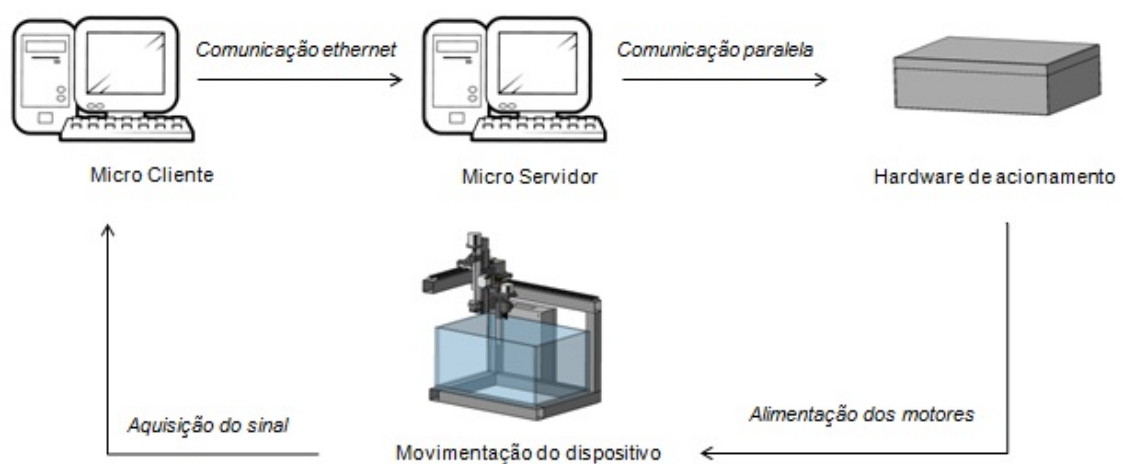


Figura 3.1 – Diagrama dos componentes do sistema para medição com ultrassom.

A disposição dos componentes mencionados e suas interligações estão exemplificados no diagrama da Figura 3.1.

3.2 Análise das necessidades e requisitos

Levantam-se a seguir as necessidades e os requisitos que a máquina deve obedecer para tornar-se uma ferramenta eficaz no contexto em que será utilizada:

- Características construtivas:
 - Deve-se ter uma grande flexibilidade nas operações, permitindo-se a inspeção de peças cilíndricas, mapeamento de campos acústicos com rotação e a capacidade de se atingir o melhor posicionamento e alinhamento entre transdutor e peça. Para tanto, cinco graus de liberdade são requeridos;
 - O espaço de trabalho do manipulador deve ser o suficiente para tornar útil a maior área possível do tanque de imersão;
 - A máquina deve ser compacta, para poder ser posicionada sobre uma mesa ou banca e realocada caso haja necessidade;
 - O acesso ao tanque e a fixação do transdutor ultrassônico devem ser realizados de maneira simples e rápida.
- Características funcionais:
 - A máquina deve ser capaz de executar uma inspeção automaticamente, a partir do fornecimento de uma trajetória descrita em código G;
 - Deve ser considerada a movimentação individual dos cinco graus de liberdade;
 - A máquina deve prover uma interface com o usuário com funcionalidades que permitam execução, controle e monitoramento de inspeções;
 - A varredura deve ser feita em dois eixos, com possibilidade de escolha e configuração destes. A varredura será realizada da seguinte maneira: definem-se um eixo principal e um eixo incremental. O transdutor, ao longo da varredura, deslocar-se-á ao longo do eixo principal, num sentido, em um trecho determinado. Chegando ao final do trecho, ele se deslocará no eixo incremental de um pequeno valor, num sentido escolhido e, a partir daí, volta a se deslocar no eixo principal, porém no sentido contrário ao inicial. De volta ao início do trecho delimitado, há um novo deslocamento no eixo incremental, no mesmo sentido do anterior. Esse processo se repete até que toda a área definida para a varredura seja percorrida;

- Elementos básicos de segurança devem estar presentes, sendo implementado botão de segurança físico e virtual (disponível na interface) capaz de interromper o funcionamento da máquina de maneira imediata.

3.3 Levantamento e escolha de soluções

Direcionando o projeto, nesta seção seguem-se diversas propostas quanto aos subsistemas componentes deste trabalho, bem como a escolha daquela considerada a mais adequada a suprir os requisitos já listados.

3.3.1 Quanto à estrutura da máquina

Para cumprir as especificações do equipamento, foram propostas três configurações de solução para a estrutura da máquina, a saber:

1. **Estrutura em pórtico móvel (Figura 3.2):** nesta configuração, um grau de liberdade de translação é movimentado através de um pórtico móvel, requerendo duas guias e dois motores para movimentar esse eixo. As duas demais translações são realizadas com o auxílio de uma guia e um motor cada. O tanque encontra-se numa mesa que está fixa à estrutura.

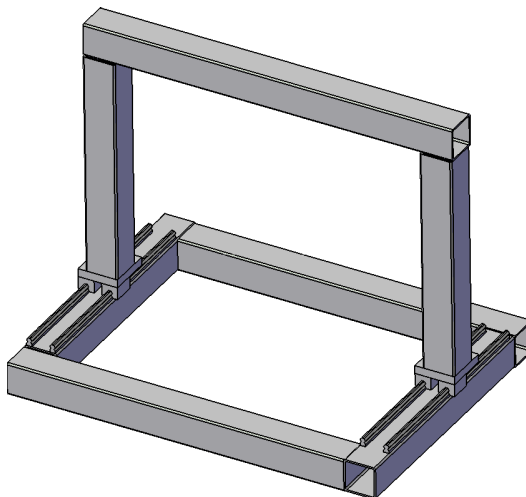


Figura 3.2 – Configuração em pórtico móvel.

2. **Estrutura em “C” com mesa fixa (Figura 3.3):** nesta proposta, os três graus de liberdade de translação estarão movimento o efetuator, permitindo que o tanque

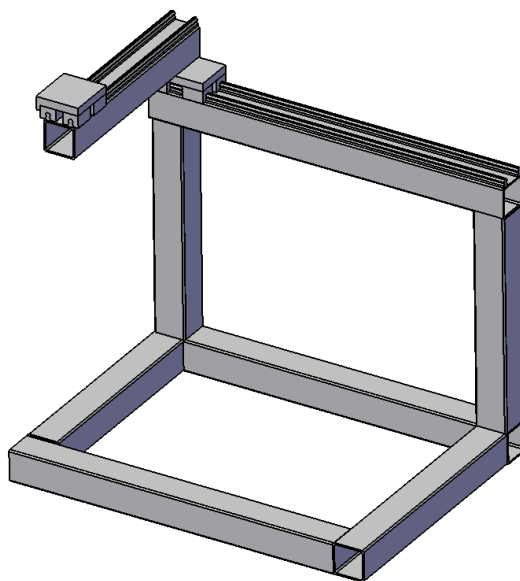


Figura 3.3 – Configuração em “C” com mesa fixa.

fique imóvel. A estrutura em “C” difere do pórtico móvel pela presença de vigas em balanço.

3. **Estrutura em “C” com mesa móvel (Figura 3.4):** nesta alternativa, o tanque está fixado a uma mesa que pode transladar em uma direção com o auxílio de uma guia e um motor. As outras duas translações são realizadas em vigas em balanço, com o uso de guia e motor.

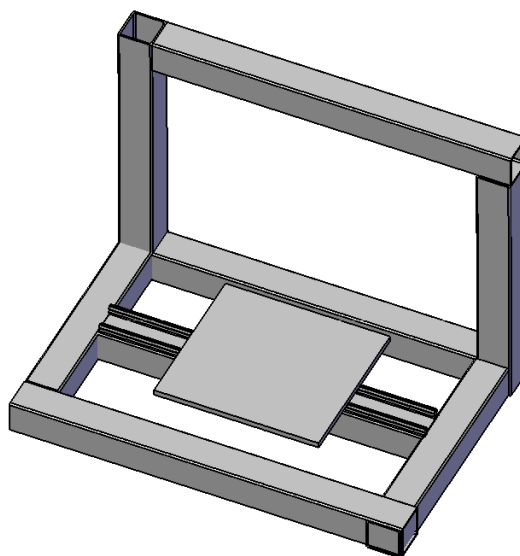


Figura 3.4 – Configuração em “C” com mesa móvel.

3.3.1.1 Critério de ponderação

As soluções propostas na seção anterior foram analisadas segundo os critérios sintetizados abaixo:

- *Dificuldade de construção e montagem:* como a máquina possui diversos componentes, é necessário avaliar a dificuldade envolvida na fabricação dos componentes e respectiva montagem;
- *Vigas em balanço:* a presença de vigas em balanço contribui para diminuir a precisão da máquina e exige estruturas de maiores dimensões para compensar a flecha e resistir aos esforços;
- *Dificuldade de operação:* a máquina deve ser de simples operação, e o tanque deve ser de fácil acesso ao operador para posicionar a peça e o transdutor ultrassônico;
- *Carga nos motores:* a carga sobre um motor aumenta quanto mais massa ele tiver que movimentar. Assim, deve-se dar preferência a configurações que apresentem uma parte estrutural fixa e poucos componentes que se movimentem;
- *Tamanho do laço estrutural:* É o circuito encontrado entre objeto associado à extremidade móvel da máquina e a peça estudada, percorrendo a estrutura e as juntas nesse trajeto. O laço menor garante maior rigidez à estrutura e, conseqüentemente, menor vibração desta.

3.3.1.2 Discussão e escolha da solução

A solução **3**, estrutura em 'C' com mesa móvel, apresenta uma clara desvantagem em relação às outras justamente por deixar um grau de liberdade para a movimentação do tanque. Como possui volume aproximado de $0,075\text{ m}^3$, quando cheio de água a massa contida em seu interior chega a quase 75 kg. Além disso, a movimentação de tamanha quantidade de líquido implicaria modelar forças de inércia para dimensionar os atuadores e a estrutura, complicação que não existe nas outras duas soluções. Pelo critério da carga nos motores, portanto, essa solução foi descartada.

A arquitetura da solução **1**, em pórtico móvel, configuração escolhida em [Adamowski, Buiocchi e Matuda 1995], é interessante por não necessitar de vigas em balanço. A presença de vigas em balanço é uma desvantagem por gerar torques nas juntas,

devido ao peso próprio, e diminuir a rigidez da máquina, efeito indesejado para um equipamento que pretende alcançar uma precisão de centésimos de milímetro. Tal solução não apresenta, em relação à solução **2**, desvantagem alguma em relação aos critérios de dificuldade de operação e tamanho do laço estrutural. No entanto, fazer-se-ia necessária a presença de atuadores nos dois lados da estrutura para, segundo o princípio do deslocador longo [Nakazawa 1994, p. 123], garantir um movimento suave.

Haveria, também, maior dificuldade na construção e montagem devido ao fato dessa arquitetura necessitar de dois conjuntos de transmissão (sistemas de guias e elemento de transferência de movimento do atuador para guias) para o grau de liberdade onde o pórtico se desloca. Os componentes citados são de precisão e de custo elevado. Além disso, exigem alinhamentos, acabamentos superficiais e peças adicionais para operarem adequadamente. Logo, a solução **1** aumentaria razoavelmente o custo do projeto.

Por isso, a solução **2**, estrutura em 'C' com mesa fixa, foi escolhida. Para compensar os efeitos da presença de vigas em balanço, a estrutura projetada deverá ser suficientemente rígida para compensar os esforços estáticos e dinâmicos presentes. A ferramenta de auxílio usada aqui será o módulo de análise com MEF (Método dos Elementos Finitos) do software CATIA.

3.3.2 Quanto ao acionamento

O atuador é o elemento responsável pelo acionamento do sistema de transmissão da máquina. Visto que neste projeto, são definidos cinco graus de liberdade para a movimentação do transdutor ultrassônico, serão necessários cinco atuadores para que isto seja possível.

Apresentam-se abaixo as alternativas de atuadores, no caso motores elétricos, dentre as quais uma será escolhida como a solução para o projeto:

- Servomotor;
- Motor de passo.

Os princípios de funcionamento desses atuadores encontram-se bem definidos em [PARKER AUTOMATION 2003]. Para a alternativa *motor de passo*, destacam-se as seguintes vantagens[Brites e Santos 2008]:

- Seguem uma lógica digital: seu acionamento é feito com pulsos discretizados;

- Precisão de posicionamento: a cada passo se desloca um valor de ângulo bem definido, cujo erro de posicionamento é pequeno e não-cumulativo.

E as suas desvantagens são:

- Perda magnética excessiva em altas velocidades se comparado ao servomotor, o que inviabiliza sua operação em velocidades superiores a 2000 rpm (rotações por minuto);
- Operação em malha aberta: não possui detecção de perda de posicionamento (“perda de passo”), caso opere em condição sobrecarregada.

Para o *servomotor*, pode-se elencar como vantagens:

- Possibilidade de operação em altas velocidades, superiores às permitidas para os motores de passo.
- Alto torque disponível, útil em operações intermitentes e movimentação de cargas inerciais, tolerando certo nível de sobrecarga.

Para designar qual atuador será escolhido, é necessário conhecer as necessidades e características deste projeto. A carga que a transmissão irá movimentar é basicamente inercial, e seu acionamento é intermitente, tanto em termos de direção como de velocidade. Essas propriedades levariam à escolha do servomotor como mais adequado [PARKER AUTOMATION 2003]. Porém, se essa movimentação não exigir altas acelerações e nem altas velocidades, o que é aplicável neste projeto, pode-se utilizar motores de passo.

Assim, por atender aos requisitos deste projeto, o motor de passo é o atuador escolhido para o manipulador.

A restrição decorrente da escolha do motor de passo, e que deve ser muito bem observada, é a configuração da curva de aceleração dos motores, realizada através do software. Esta curva deve ser suave, no sentido de não haver acelerações bruscas, sob o risco de perda de passo do motor, e, por consequência, a ocorrência de erro no posicionamento.

3.3.3 Quanto à transmissão

3.3.3.1 Translação

O sistema de transmissão, para os eixos de translação, é composto por guias lineares e conversores de movimento rotativo para translacional, devido ao fato de o acionamento

ser basicamente feito por atuadores rotativos.

Guias lineares

Os principais requisitos para o projeto de guias lineares podem ser resumidos em [Sanches 2009]:

- Elevada precisão dimensional e de forma macrogeométrica;
- Elevada rigidez (guias e suportes);
- Baixo coeficiente de atrito.

Há diversos tipos de guias, e uma forma de classificá-las é conforme o contato entre o elemento fixo e o elemento móvel. Assim, são apresentados os seguintes tipos:

- Guia de deslizamento, onde os elementos deslizam entre si, num contato de superfícies sólidas, apresenta coeficiente de atrito maior;
- Guia de rolamento, onde há elementos de revolução (esferas, cilindros) entre o elemento fixo e o móvel. O contato é pontual ou limitado a uma linha, sendo o atrito de rolamento, resultando em um coeficiente de atrito menor que aquele relativo a guias de deslizamento;
- Guias fluídicas, nas quais há um filme de fluido que separa o elemento fixo do móvel, não havendo contato entre estes. Isso garante um coeficiente de atrito praticamente nulo. O fluido pode ser líquido ou gasoso.

O primeiro tipo de guia tem como vantagem o menor custo, porém, apresenta o maior coeficiente de atrito e a pior precisão. Outro fator é a ocorrência do fenômeno indesejado stick slip [Nakazawa 1994, p. 128–130].

O segundo tipo, de rolamento, possui características melhores que as de deslizamento, apesar de ter um custo mais elevado.

As guias fluídicas são as mais eficientes, porém, tem um custo muito elevado, além de exigir maiores cuidados para manter suas vantagens.

Desta forma, o tipo de guia a ser utilizado será de rolamento da empresa *Hiwin*, por apresentar um bom custo benefício e cumprir os requisitos necessários. Seu catálogo está disponível em [Hiwin 2008]

No grupo das guias de rolamento, há diversos modelos disponíveis, tais como: guia linear cilíndrica e guia linear de rolamento, entre outros.

A guia linear cilíndrica, como observada na Figura 3.5, apresenta seção transversal circular e tem como elemento móvel um rolamento que se move através da recirculação de esferas em seu interior, propiciando um movimento suave.



Figura 3.5 – Guia linear cilíndrica [OBR Equipamentos Industriais Ltda 2012].

A guia linear de rolamento tem como característica uma seção transversal de formato próximo ao retangular, o deslizamento entre o componente móvel e fixo é realizado por intermédio de esferas que promovem um contato linear entre os dois elementos. A Figura 3.6 exhibe um modelo desse tipo de guia.



Figura 3.6 – Guia linear de rolamento [Manutenção e Suprimentos 2012].

No comparativo entre os dois tipos, observam-se algumas diferenças:

- Enquanto a guia de rolamento se apóia sobre toda sua extensão, a guia cilíndrica em geral é apoiada somente em suas extremidades. Logo, a guia linear tem uma tendência de maiores deformações, principalmente no trecho central, devido ao peso suportado. Na guia de rolamento esse problema não se evidencia;
- A fixação de uma mesa de forma retangular é mais facilmente alcançada na guia linear de rolamento, devido ao formato dos elementos móveis (retangulares e não cilíndricos);
- A guia linear de rolamento, para manter sua boa precisão, necessita estar assentada sobre uma superfície com tolerâncias geométricas bem controladas ao longo de toda extensão da guia, enquanto na guia cilíndrica essa questão se resume somente onde as extremidades serão apoiadas.

Avaliando esses quesitos, a guia linear de rolamento mostra-se como a melhor alternativa a ser usada no manipulador.

Transmissão conversora de movimento

Os requisitos dinâmicos que devem orientar o projeto e seleção de transmissões conversoras são [Sanches 2009]:

- Rigidez elevada, na medida da rigidez dos demais componentes mecânicos;
- Inércia e massas tão reduzidas quanto possível;
- Folga tão reduzida quanto possível.

Para a seleção dessa transmissão, há como opções o uso de um conjunto pinhão/cremalheira ou fuso trapezoidal ou fuso de esferas recirculantes, entre outros.

O sistema pinhão/cremalheira apresenta custo baixo, porém sofre com problemas de vibrações e não possui uma boa exatidão no posicionamento [Horikawa 2011].

O fuso trapezoidal também é relativamente barato, mas é afetado pelo alto atrito, devido ao tipo de contato entre o fuso e a castanha (parte móvel).

O fuso de esferas recirculantes tem como vantagens [Deutschman, Michels e Wilson 1975]:

- Alta eficiência, acima de 90% em geral;
- Posicionamento preciso e boa repetibilidade;
- Não ocorre o fenômeno stick-slip.

E suas desvantagens:

- Necessidade de lubrificação para não prejudicar sua vida útil;
- A entrada de sujeira ou corpos estranhos no interior da castanha pode danificar ou mesmo inutilizar toda a peça;
- O custo é maior se comparado a outros equipamentos.

Levantadas essas características, constata-se que a melhor solução para ser empregada é o uso de fusos de esferas recirculantes. A empresa escolhida é novamente a *Hiwin*, cujo catálogo encontra-se em [Hiwin 2008].

3.3.4 Quanto ao acoplamento

Para se transmitir potência entre o atuador e um dos eixos (rotativos), no caso deste projeto entre o motor de passo e o fuso de esferas recirculantes e entre o motor de passo e o conjunto coroa/sem-fim, utiliza-se um elemento conhecido como acoplamento mecânico.

Há duas categorias de acoplamentos mecânicos: os rígidos e os elásticos. Os rígidos são simples e de baixo custo, fornecem alta rigidez através da junta, porém requerem alinhamentos colineares precisos dos eixos a serem acoplados. Qualquer desalinhamento entre os eixos podem causar grandes esforços nos componentes conectados. Os elásticos são capazes de acomodar pequenos desalinhamentos e, por se adequarem à maioria das situações, são os acoplamentos normalmente mais utilizados [Collins 2006].



Figura 3.7 – Modelo de acoplamento de fole [FreioMix 2012].

Assim, diante do exposto, o acoplamento a ser utilizado será do tipo elástico. Esse tipo de acoplamento é subdividido em tres grupos, conforme o tipo de componente responsável por acomodar os desalinhamentos, que são:

- Componente rígido intermediário que desliza ou introduz pequenas folgas entre os eixos (acoplamentos de engrenagens, de corrente);
- Componente metálico elástico intermediário (acoplamentos de mola, de discos flexíveis, de fole);
- Componente flexível elastomérico intermediário (acoplamentos de luva flexível, de disco elastomérico colado, com elemento de borracha).

Dos tipos mencionados, o acoplamento de fole possui valores razoáveis para suportar desalinhamentos. Compensa até 1/4 de polegada de desalinhamento paralelo entre os eixos e até 9° de desalinhamento angular, conforme [Collins 2006]. O modo de falha mais representativo neste modelo é a fadiga, e seu uso mais recomendado para aplicações de baixo torque. Como a mudança de sentido da rotação do atuador não será constante, nem os torques envolvidos elevados, o acoplamento de fole (sanfonado), como o da Figura 3.7, será utilizado.

3.3.5 Quanto ao software

O subsistema de software deve ser responsável por:

- Definir uma trajetória a ser seguida pelo dispositivo mecânico projetado;
- Controlar o movimento dos motores de maneira a seguir a trajetória desejada;
- Obter e armazenar informação aquirada;
- Sincronizar movimento e aquisição de dados;
- Prover interface com o usuário;

Poder-se-ia conceber um único software com várias *threads*, capaz de executar “simultaneamente” cada tipo de operação citada. Poder-se-ia, alternativamente, prover vários *daemons* executando, cada qual, uma tarefa específica, comandados por um processo pai. A deficiência nos casos citados, no entanto, encontra-se na dificuldade de se garantir, de maneira efetiva, a qualidade do movimento do manipulador.

Aproveitando-se do *know-how* e esforço já empenhado em relação ao software de equipamentos previamente concebidos, arquitetura semelhante à existente no Laboratório de Ultrassom da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo é estabelecida.

A fim de se prover isolamento entre controle da máquina (tarefa delicada, e com um determinado caráter síncrono quanto à geração de sinais de controle) de ação do usuário (totalmente assíncrona e com efeito generalizado sobre o sistema), são necessários dois microcomputadores. Àquele responsável pelo controle do dispositivo, dá-se o nome de *servidor*. Ao outro, nomeia-se *cliente*.

O *servidor*, de maneira a prover compatibilidade com o sistema já existente no Laboratório, deve basear-se no sistema operacional em tempo-real “Linux CNC”.

4 *Projeto Executivo*

4.1 Introdução

Com base nas decisões tomadas no capítulo 3, definem-se agora os rumos que o projeto deve tomar, detalhando as soluções definidas.

Visando a compartimentização das etapas de projeto e execução do trabalho em questão, este foi separado nos subsistemas “mecânico”, de “*hardware*” e de “*software*”.

4.2 Subsistema mecânico

Representa o aspecto físico da máquina. Nesta seção são desenvolvidos as tarefas de seleção e dimensionamento dos componentes estáticos e móveis que constituem o dispositivo.

4.2.1 Estrutura

4.2.1.1 Materiais

Decidida a arquitetura da máquina, a próxima etapa é selecionar os materiais que serão usados. Partiu-se da ideia de utilizar perfis tubulares de seção quadrada e investigou-se, entre aço e alumínio, qual seria mais adequado para utilização, além de qual deveria ser a largura ótima da seção transversal do perfil.

Analisando a Tabela 4.1, o alumínio é um material de menor densidade que o aço. Por outro lado, pelo fato de possuir tensão de escoamento e módulo de Young inferiores (menor rigidez), este nem sempre é o material mais indicado para a aplicação. A estratégia que seguirá é a de especificar uma estrutura realizar análises para validar a solução.

Tabela 4.1 – Propriedades dos materiais candidatos à composição da máquina.

Material	Densidade (m/cm^3)	Tensão de escoamento (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Alumínio	2710	95	70
Aço 1020	7860	250	200

A estrutura proposta, avaliada nas simulações que se seguem, é composta por perfis tubulares quadrados, de lado 60 x 60 mm e espessura da parede de 5 mm. Para estes perfis, foi proposto aço como material, no intuito de se aumentar a rigidez da estrutura. Para as vigas em balanço, para evitar que o peso próprio das barras gere momentos excessivos nos apoios, optou-se pelo alumínio.

4.2.1.2 Análise de frequência

Ao realizar-se uma análise de frequência na máquina, para que se considere uma estrutura suficientemente rígida dinamicamente, espera-se que a primeira frequência natural encontrada esteja acima de 60 Hz. O valor encontrado para a estrutura foi de 232 Hz, conforme mostra a Figura 4.1

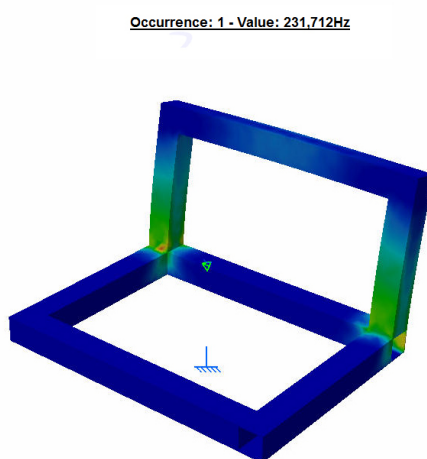


Figura 4.1 – Primeiro modo de vibrar para a estrutura da máquina.

Em seguida, realizou-se mesma análise para a estrutura completa, incluindo as vigas em balanço. O conjunto giratório foi modelado como uma massa concentrada.

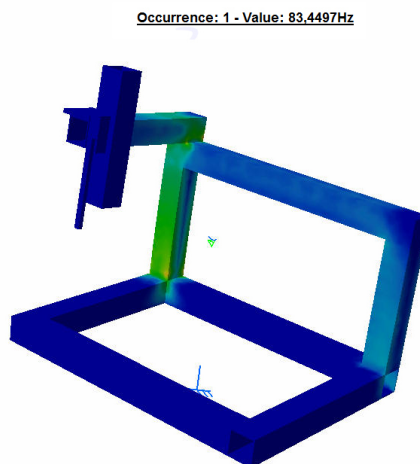


Figura 4.2 – Primeiro modo de vibrar para a máquina completa.

Como o valor encontrado, de 83,5 Hz está acima do limite inferior proposto, a solução foi considerada aceitável e seguiu-se para a próxima análise.

4.2.1.3 Análise dinâmica

Aqui, há dois critérios que devem ser observados. O primeiro diz que a tensão atuante na seção deve ser sempre inferior que a tensão de escoamento do material (levando em conta, é claro, o coeficiente de segurança). O segundo critério é do máximo deslocamento admissível, isto é, deve-se verificar que o máximo deslocamento da estrutura, para uma dada força, está dentro de um limite superior aceitável.

Para o critério tensão atuante, foi verificado que a maior tensão encontrada é aproximadamente 2 MPa, o que está muito distante da tensão de escoamento tanto do aço quanto do alumínio.

A solução também foi aprovada pelo critério do máximo deslocamento admissível, uma vez que este, conforme indica a figura 8, tem ordem de grandeza de centésimos de milímetros.

Analisando os resultados da análise estática, verifica-se que os valores obtidos estão bem distantes daqueles considerados críticos. No entanto, o que se deseja na máquina é uma grande rigidez e o valor obtido na análise de frequência não é tão confortável assim,

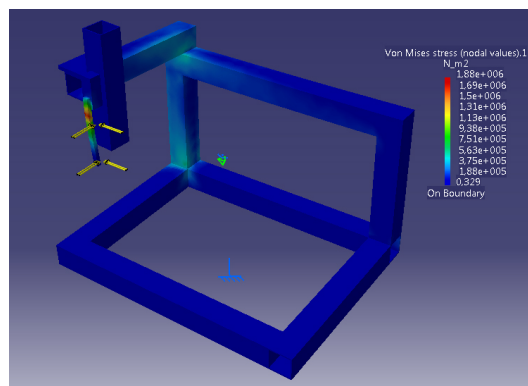


Figura 4.3 – Tensões de Von Mises na estrutura da máquina.

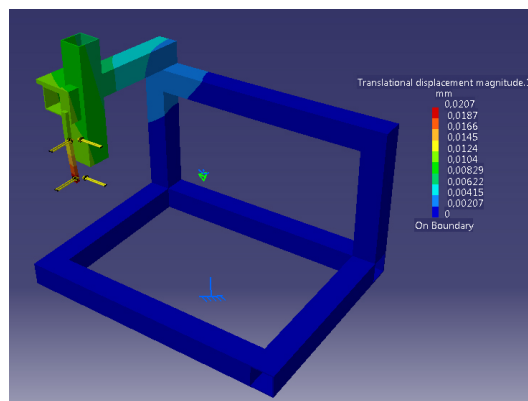


Figura 4.4 – Deslocamentos na estrutura da máquina.

portanto conclui-se que máquina, nessa solução, não está super-dimensionada.

4.2.2 Projeto da transmissão

4.2.2.1 Translação

Guias lineares

Para cada eixo de translação será utilizado um par de guias lineares de rolamento, e para cada guia, serão utilizados dois blocos deslizantes. Desta forma, garante-se a sustentação necessária para cada mesa que será apoiada sobre as guias.

A especificação do conjunto guia e bloco deslizante será feita com base em três critérios: capacidade de carga dinâmica, momento fletor tolerado e comprimento da guia. A direção dos momentos fletores aqui adotado é sintetizado na Figura 4.5.

Para o eixo X, os requisitos são:

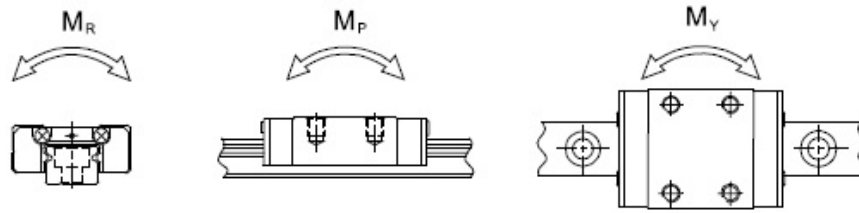


Figura 4.5 – Direções do momento fletor no bloco deslizando [Hiwin 2008].

- Carga suportada: 98 N;
- Momento fletor: 49 Nm, na direção MR;
- Comprimento: 760 mm.

Com estes dados, a série escolhida foi a HG [Hiwin 2008], que suporta altas cargas. O modelo da guia selecionado é o HGR15-R760-C, cuja capacidade de carga dinâmica é de 11,38 kN e tem comprimento de 760 mm; o bloco deslizando é o modelo HGH15-C-A-Z0-C, que possui momento fletor limite de 120 Nm na direção MR. Para o eixo Y, os requisitos são:

- Carga suportada: 62 N;
- Momento fletor: 10 Nm, na direção MR;
- Comprimento: 460 mm.

A série escolhida, neste caso, foi a EG [Hiwin 2008], que suporta cargas um pouco inferiores às da HG. O modelo da guia selecionado é o EGR15-R460-C, com capacidade de carga dinâmica de 5,35 kN e comprimento de 460 mm; o bloco deslizando é o modelo EGH15-S-A-Z0-C, cujo momento fletor limite é de 80 Nm na direção MR.

Para o eixo Z, os requisitos são:

- Carga suportada: 34 N;
- Momento fletor: 2 Nm, na direção MP;
- Comprimento: 320 mm.

A série escolhida para o eixo Z foi a MGN [Hiwin 2008], de dimensões e capacidade de carga reduzida, que colabora no aproveitamento do espaço de trabalho do manipulador. O modelo da guia selecionado é o MGNR12-R320-C, cuja capacidade de carga dinâmica é de 2,84 kN e comprimento de 320 mm; o bloco deslizante é o modelo MGN12-C-Z1-C, que possui momento fletor limite de 12 Nm na direção MP.

As guias selecionadas estão na classe de precisão “normal”, e apresentam a seguinte precisão de paralelismo no movimento linear [Hiwin 2008]:

- Para a série HG, 22 μm para comprimentos de 700 a 900 milímetros;
- Para a série EG, 22 μm para comprimentos de 700 a 900 milímetros;
- Para a série MGN, 18 μm para comprimentos de 315 a 400 milímetros.

A pré-carga nos componentes da guia linear serve para elevar a rigidez, porém, elevados valores de pré-carga aumentam muito o atrito. Assim, a pré-carga não deve ser superior a 10% da capacidade de carga [Horikawa 2011].

As guias da série HG e EG são fabricadas em aço, o que requer a aplicação de uma camada protetora contra oxidação, principalmente pelo tanque de imersão conter água em seu interior. A guia da série MGN é fabricada em aço inoxidável, e, portanto, não corre esse risco [Hiwin 2008].

Por fim, é importante manter uma lubrificação eficiente dos componentes das guias lineares, para assegurar um bom desempenho delas e não causar redução drástica da vida útil das mesmas.

Transmissão conversora de movimento

A especificação de fusos de esferas recirculantes possui várias etapas, as quais devem ser seguidas atentamente.

O primeiro passo é decidir qual o tipo de fabricação do fuso pretendido: se laminado ou se retificado. A principal diferença entre os dois é com relação a precisão: o fuso do tipo retificado possui melhor precisão que o laminado. No entanto, neste projeto, o fuso usado será laminado. A justificativa, apesar dele ter pior precisão de movimento, é o seu custo muito reduzido se comparado ao retificado, e também porque este último não tem disponibilidade imediata, somente sendo adquirido através de importação, com um longo prazo de espera (na sondagem realizada, superior a três meses).

Ainda visando precisão, é desejável que se tenha a menor folga axial possível. Uma alternativa seria o uso de pré-carga, a qual pode ser aplicada no fuso de várias maneiras, como através do uso de castanha dupla, ou uso de esferas de tamanhos maiores em castanhas simples. Porém, este artifício causaria um aumento excessivo do atrito no caso de fusos laminados, sendo descartado o seu uso.

Prosseguindo com o projeto, chega-se à forma de fixação do fuso à estrutura, que define a configuração dos mancais. Caso a extremidade seja fixada, ela receberá um mancal com dois rolamentos adjacentes; caso seja suportada, o mancal terá um rolamento apenas; se a extremidade ficar livre, não receberá nenhum mancal. As possibilidades de fixação que aparecem no catálogo do fabricante [Hiwin 2008] são:

- Fixada em uma extremidade e suportada na outra;
- Fixada nas duas extremidades;
- Suportada nas duas extremidades;
- Fixada em uma extremidade e livre na outra extremidade.

O fuso será fixado em uma extremidade e suportado na outra, no caso deste manipulador. A especificação dos mancais será feita posteriormente.

A etapa seguinte é a definição do diâmetro e passo (distância entre cristas de filetes consecutivos) do fuso para cada eixo de translação. Elaborou-se a Tabela 4.2 com os dados referentes a aplicação, a qual foi compartilhada com a empresa para a seleção:

Tabela 4.2 – Fatores de escolha de diâmetros e passos dos fusos.

Eixo	Comprimento (<i>mm</i>)	Posição	Carga (<i>kg</i>)	Velocidade máxima (<i>m/s</i>)	Aceleração máxima (<i>m/s²</i>)
X	600	Horizontal	10	0,5	10
Y	350	Horizontal	6,5	0,5	10
Z	250	Vertical	4	0,5	10

Com a disponibilidade desses dados foram propostos os seguintes fusos [Hiwin 2008]:

- Eixo X: diâmetro de 16 mm e passo de 5 mm;
- Eixo Y: diâmetro de 12 mm e passo de 5 mm;
- Eixo Z: diâmetro de 12 mm e passo de 5 mm.

O quesito seguinte é escolher qual castanha utilizar. Para a transferência de movimento entre o fuso e a mesa que ele irá mover ser possível, é necessário que as castanhas possuam flanges, estruturas na qual podem ser fixadas peças para permitirem a troca do movimento. Quanto ao tipo de recirculação das esferas, não há fatores restritivos. A castanha será do tipo simples, por motivos já explicados.

Logo, foram selecionadas as seguintes castanhas [Hiwin 2008]:

- Eixo X: tipo FSI, simples com flange e recirculação interna;
- Eixo Y: tipo FSW, simples com flange e tubo dentro do diâmetro da castanha;
- Eixo Z: tipo FSW, simples com flange e tubo dentro do diâmetro da castanha.

Tanto o fuso de esferas recirculantes quanto a castanha são constituídos de aço.



Figura 4.6 – Fuso de esferas recirculantes, com castanha em corte [Mec Parts 2012].

Mancais

Para a fixação dos fusos à estrutura da máquina serão utilizados mancais de rolamento. O objetivo desse tipo de mancal é “[...] permitir um movimento relativo entre duas peças

de máquinas, usualmente um eixo rotativo e uma estrutura fixa, enquanto suporta as cargas aplicadas.” [Collins 2006]. O mancal de rolamento é composto por sua estrutura física e pelos elementos rolantes, ou simplesmente rolamentos.

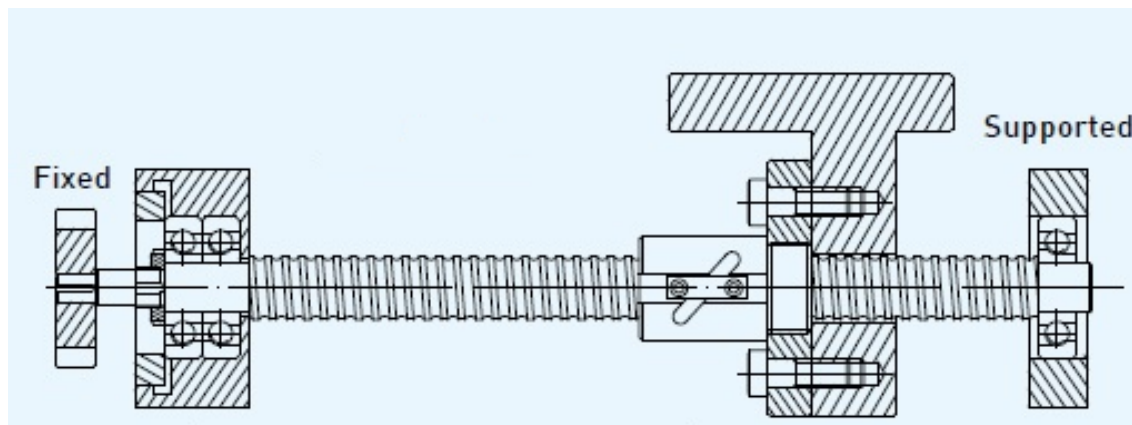


Figura 4.7 – Esquema de fixação do fuso com mancais e rolamentos [Hiwin 2010].

Os mancais usados neste manipulador serão aqui projetados e usinados nas dependências da Escola Politécnica da USP. O motivo de não se utilizar um produto comercial está relacionado ao seu preço, sendo mais barato fabricá-los internamente. O material escolhido para usinagem é o alumínio, devido a não haver cargas elevadas ou de impacto e ser um material leve se comparado ao aço e ter boa usinabilidade, de forma geral.

Haverá dois tipos de mancais para cada fuso, segundo a fixação do fuso definida previamente. O primeiro será o mancal fixo, que abrigará dois rolamentos, e o mancal de suporte, o qual abrigará somente um.

A estratégia para projetar esses mancais envolve os seguintes princípios:

- Garantir que não haja movimento relativo entre o anel externo do rolamento e a estrutura fixa do mancal, ou seja, que sejam montados com interferência;
- Prover um ajuste entre eixo e rolamento onde o ajuste seja justo, porém sem interferência, o que facilita uma posterior desmontagem sem danos;
- Impedir o movimento axial do fuso durante sua operação.

Para cumprir esses objetivos, é necessário conhecer, primeiramente, as dimensões e tolerâncias do fuso, principalmente no local onde os mancais serão assentados; por conseguinte, verificar as opções de rolamentos comerciais cujas dimensões sejam adequadas,

observando também suas tolerâncias; e enfim, as dimensões e tolerâncias necessárias para a estrutura fixa do mancal e demais elementos necessários à fixação.

Inicialmente, considera-se o mancal fixo. A usinagem dos fusos na extremidade que é fixada é mostrada na Figura 4.8:

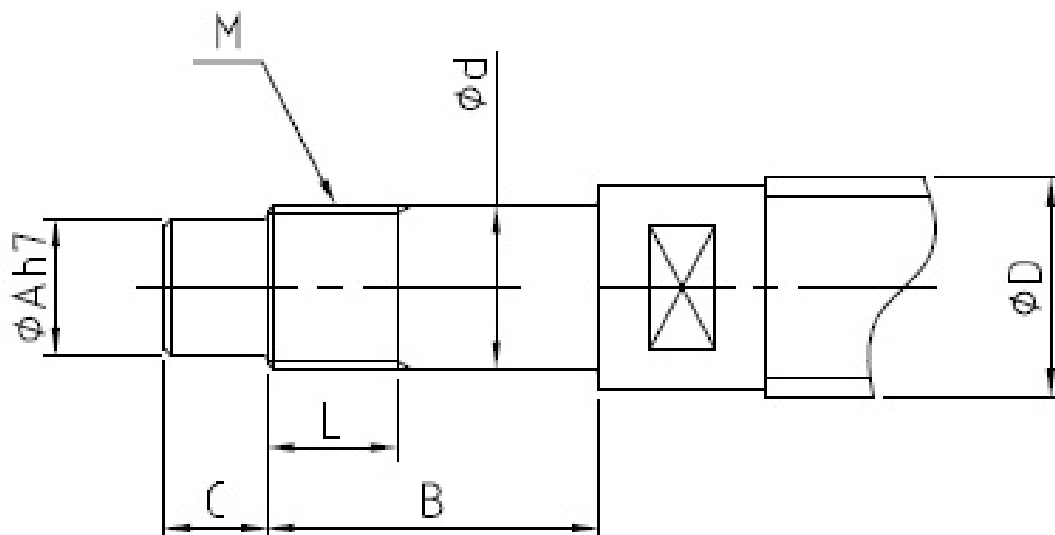


Figura 4.8 – Detalhe da extremidade fixa dos fusos projetados [Tink Roll 2011].

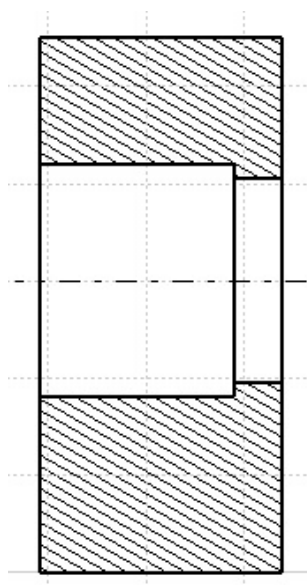


Figura 4.9 – Vista em corte da seção do mancal fixo.

Tabela 4.3 – Dimensões para a extremidade fixa dos fusos.

Eixo	A	B	C	ϕd	ϕD	L	M
X	10	36	15	12	16	14	M12
Y	8	36	15	10	12	16	M10
Z	8	36	15	10	12	16	M10

Dimensões em milímetros.

Tabela 4.4 – Dados dos rolamentos selecionados para os mancais fixos [SKF 2012].

Eixo	Código do rolamento	Quantidade	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro externo (mm)	Largura (mm)
X	61901	2	12	24	6
Y	61900	2	10	22	6
Z	61900	2	10	22	6

Os valores das dimensões para cada fuso estão na Tabela 4.3

De posse dessas dimensões, é possível selecionar os rolamentos que se adequam ao fuso. Os rolamentos utilizados nesse projeto serão todos do tipo uma carreira de esferas e fornecidos pela empresa SKF.

Assim, foram selecionados os modelos da Tabela 4.4 para a extremidade fixa;

A Figura 4.9 mostra uma vista em corte do mancal fixo. Observa-se que o furo de maior diâmetro deve ter o mesmo diâmetro do anel externo onde serão encaixados os dois rolamentos com interferência, portanto, o valor desse diâmetro será:

- 24 mm para o mancal fixo do eixo X;
- 22 mm para os mancais fixos dos eixos Y e Z.

O furo de diâmetro menor serve como um apoio lateral para a pista externa do rolamento. O rolamento será empurrado através do furo maior até que encoste no ressalto

originado pelo furo menor. Assim, a medida escolhida para esse diâmetro, com base no catálogo do fabricante, foi de dois milímetros a menos que o do furo maior, ou seja:

- 22 mm para o diâmetro menor do mancal fixo do eixo X;
- 20 mm para o diâmetro menor dos mancais fixos dos eixos Y e Z.

Com as informações obtidas, consegue-se definir a tolerância geométrica do furo onde os rolamentos serão alojados. O limite inferior e superior da tolerância é função do diâmetro do furo, da classe de tolerância e da qualidade de trabalho. Como o ajuste necessário é com interferência, foi definido que o limite superior da tolerância do furo seja menor que o limite inferior da tolerância do anel externo do rolamento. A tolerância do anel externo dos rolamentos, para os diâmetros acima, estão na faixa de zero a -0,008 mm. Desse modo, a tolerância escolhida para o furo foi a N5 que, para diâmetros entre 18 e 30 mm, apresenta valores entre -0,012 e -0,021 mm. A usinagem realizada no fuso, no local onde se assentam os rolamentos, garante uma combinação de tolerâncias que geram um ajuste conhecido como deslizante justo, um tipo de ajuste incerto, e que facilita uma desmontagem sem danificar o conjunto, caso seja necessária. Para travar o fuso na direção axial, ou seja, evitar deslocamentos nessa direção, necessita-se usar um pequeno espaçador e utilizar uma porca com parafuso de aperto. O espaçador deve ser cilíndrico, de parede esbelta, de forma que possa ser colocado concêntrico ao fuso e encostar somente no anel interno do rolamento. O seu comprimento é determinado para que quando inserido no fuso, termine na parte roscada e ainda reste alguns filetes aparentes. Por fim, a porca é determinada para o diâmetro e passo da rosca do fuso, e tenha um parafuso que seja apertado contra o eixo do fuso, para que não se afrouxe durante a montagem. Os tópicos seguintes descrevem a montagem do mancal fixo e do fuso:

- Inserir os dois rolamentos até encostar no ressalto do mancal;
- Colocar o eixo do fuso e ajustá-lo na posição projetada;
- Inserir o espaçador na extremidade do fuso, até tocar no anel interno do rolamento;
- Rosquear a porca no fuso até que pressione o espaçador, travando o movimento axial;
- Apertar o parafuso contra o eixo para travar a porca.

Considerando agora o mancal suportado. A usinagem dos fusos na extremidade suportada pode ser vista no esquema da Figura 4.10.

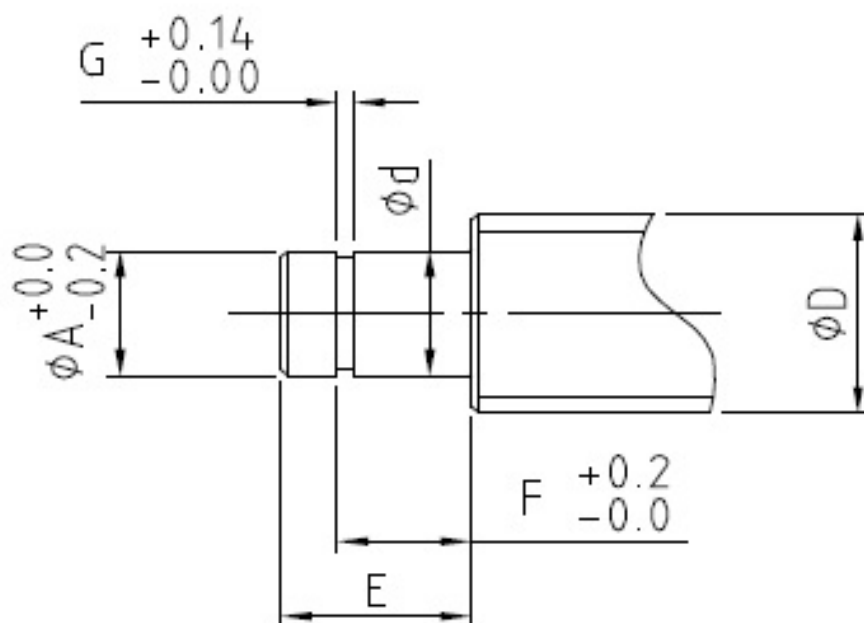


Figura 4.10 – Detalhe da extremidade suportada dos fusos projetados [Tink Roll 2011].

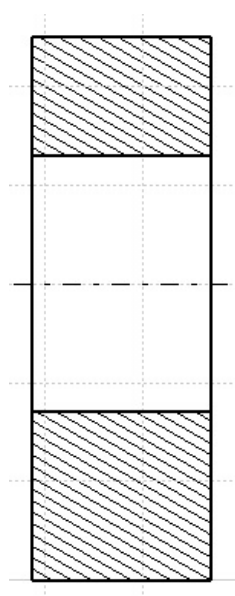


Figura 4.11 – Vista em corte da seção do mancal suportado.

Os valores das dimensões para cada fuso estão na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Dimensões para a extremidade suportada dos fusos.

Eixo	A	ϕd	ϕD	E	F	G
X	9,6	10	16	11	9,5	1,15
Y	7,6	8	12	10	7,9	0,90
Z	7,6	8	12	10	7,9	0,90

Dimensões em milímetros.

Conhecendo os valores das dimensões do fuso para a extremidade suportada, os rolamentos da Tabela 4.6 foram escolhidos para os mancais suportados.

Tabela 4.6 – Dados dos rolamentos selecionados para os mancais suportados [SKF 2012].

Eixo	Código do rolamento	Quantidade	Diâmetro interno (mm)	Diâmetro externo (mm)	Largura (mm)
X	61901	1	10	26	8
Y	608	1	8	22	7
Z	608	1	8	22	7

Observa-se que para este caso, os valores da largura dos rolamentos foram iguais ao espaço disponível onde eles irão ser alojados, na extremidade suportada do fuso. Isso revela a importância de projetar o fuso, ou qualquer outro elemento mecânico, levando em consideração os modelos comerciais de componentes que serão montados em conjunto, poupando custos adicionais e desnecessários.

A Figura 4.11 mostra uma vista em corte do mancal suportado.

Observa-se que o furo passante deve ter o mesmo diâmetro do anel externo onde serão encaixados os dois rolamentos com interferência, portanto, o valor desse diâmetro será:

- 26 mm para o mancal suportado do eixo X;

- 22 mm para os mancais suportados dos eixos Y e Z.

De maneira semelhante à realizada no caso dos mancais fixos, a tolerância dos furos para que haja interferência entre o rolamento e o mancal suportado, nos três casos, é a N5, que para valores de diâmetro entre 18 e 30 mm fica entre -0,012 e -0,021 mm.

A usinagem realizada na extremidade suportada do fuso é semelhante àquela feita na outra extremidade e busca os mesmos propósitos que os descritos anteriormente.

Como na extremidade onde há o mancal fixo já existe a restrição do movimento axial, não seria necessário nenhuma intervenção nesse sentido. Apesar disso, nesta extremidade existe uma ranhura no eixo, que permite a inserção de um anel de retenção para eixos, uma outra alternativa para limitar deslocamento axial. O anel de retenção possui como vantagem sua fácil instalação e retirada, no caso de desmontagem. Possui medidas padronizadas por normas, o que simplifica sua seleção.

As etapas de montagem do mancal suportado encontram-se a seguir:

- Inserir o rolamento no mancal;
- Encaixar a extremidade do fuso no rolamento, até enconstar no anel interno;
- Ajustar a posição relativa do rolamento e mancal, conforme necessário;

4.2.2.2 Rotação

Quando se deseja transmitir movimento rotacional de um eixo rotativo (entrada) para outro (saída), existem várias alternativas disponíveis. Pode-se citar como exemplos os sistemas de transmissão por correias, por correntes, por volantes e por engrenagens [Collins 2006].

Nesta aplicação, são definidos alguns critérios que irão nortear o processo de escolha da melhor transmissão, os quais são:

- O sistema de transmissão deve ser compacto;
- Deve ter uma boa eficiência;
- Deve garantir rigidez elevada e não gerar muita vibração;
- Deve ter boa precisão e folga menor possível.

Dos sistemas apresentados anteriormente, o por engrenagens são, de forma geral, os mais compactos. Este sistema será adotado neste projeto, porém, existem diversas formas de se transmitir movimento com engrenagens. Estas podem ser subdivididas em três grupos:

- Os eixos de entrada e saída são paralelos;
- Os eixos de entrada e saída são concorrentes (se cruzam em um ponto);
- Os eixos de entrada e saída são reversos (não se interceptam).

A primeira opção possui a desvantagem de não ser tão compacta, pois suas duas engrenagens se encontram em planos iguais ou paralelos, tornando esse plano mais ocupado que outros. A segunda opção tem a desvantagem que o eixo de cada engrenagem só pode ser apoiado em um lado, assim, as engrenagens ficam posicionadas “em balanço”. A terceira opção tem engrenagens em planos diferentes e possibilita que uma das engrenagens possa ser apoiada em ambos os lados do eixo. Portanto, esta é a escolhida para rotação.

O principal tipo de engrenamento da categoria escolhida é realizado pelo conjunto coroa e sem-fim. O sem-fim se assemelha a um parafuso sem cabeça com filetes similares aos de um fuso. A coroa se parece com uma engrenagem com dentes semelhantes aos helicoidais, exceto por estes serem delineados para envolver o sem-fim. O conjunto tem como característica elevadas razões de redução, embora haja pequenas perdas por atrito, devido ao deslizamento lateral entre os filetes do sem-fim e os dentes da coroa. Possui também alto sincronismo de movimento, vida útil elevada e razoável transmissão de vibrações. Este é o modelo que será especificado.

O sem-fim pode ter uma ou várias entradas. Neste caso, ele terá somente uma entrada. Ele será fabricado em aço inoxidável, principalmente por estar próximo de fontes de umidade. A coroa será constituída de uma liga de bronze, material comumente utilizado para esta peça. Os seguintes parâmetros foram utilizados para dimensionar a coroa e o sem-fim:

- Número de entradas no sem-fim: 1;
- Módulo normal: 0,8;
- Ângulo da hélice: 3,5°;



Figura 4.12 – Conjunto coroa e sem-fim [USIWAL Indústria mecânica 2012].

- Ângulo de pressão: 20° ;
- Número de dentes da coroa: 45.

Com estes valores, determinou-se:

- Diâmetro máximo da coroa: 38,5 mm;
- Largura da coroa: 6,4 mm;
- Comprimento do sem-fim (filetes): 12,4 mm.

Essas informações, juntamente com os desenhos de fabricação da coroa e sem-fim, foram enviadas para a empresa Fresadora Santana, a qual ficou responsável pela fabricação destas peças. Dois conjuntos foram solicitados no orçamento, um para ser utilizado na rotação em torno do eixo Z e o outro para a rotação de “balanço”.

O desenho do sem-fim já contemplava a usinagem dos locais onde seriam assentados os rolamentos do seu mancal, sendo um em cada extremidade, assim como a conexão com o elemento de acoplamento ao atuador.

O mancal concebido teve como base os critérios utilizados nos projetados para os eixos de translação, assim como a seleção dos rolamentos.

A montagem da transmissão, para cada eixo de rotação, prevê ainda um artifício para a eliminação da folga normalmente presente em sistemas de engrenagens. A técnica

utilizada foi adaptar uma mola à coroa, gerando um momento sobre esta que faz seus dentes sempre estarem em contato com os filetes do sem-fim.

O sistema de engrenagens coroa e sem-fim é muito sensível a erros de alinhamento: por menores que sejam, causam folgas no conjunto e perda de precisão do engrenamento. Deste modo, prever certa liberdade de ajuste nas peças onde o conjunto será montado é muito útil.

4.2.3 Acoplamento

O tipo do acoplamento de fole escolhido para o projeto é o acoplamento de fole DKN. Os principais dados para selecionar aquele mais adequado são: o diâmetro do eixo que se encaixa em cada extremidade e o torque aplicado. Abaixo, encontra-se a tabela que reproduz a necessidade que cada acoplamento deve atender:

Tabela 4.7 – Requisitos para seleção dos acoplamentos.

Eixo	Diâmetro eixo motor (mm)	Diâmetro eixo fuso (mm)	Torque (Nm)
Translação X	6,35	10	1,13
Translação Y	6,35	8	0,83
Translação Z	6,35	8	0,79
Rotação Z	6,35	6	0,44
Rotação balanço	6,35	6	0,43

Com estes dados, o acoplamento DKN 15/26, da empresa Kalatec [Kalatec 2012], foi o selecionado para todos os eixos do manipulador. Este acoplamento é fabricado em alumínio, como a maioria dos outros acoplamentos de fole, e suporta torque de até 1,5 Nm, suficiente para suportar os torques acima. O motivo de todos os escolhidos serem iguais se justifica pela indisponibilidade, no momento da compra, de modelos de menor torque, mais adequados para os eixos de rotação. Em compensação, todos os diâmetros acima descritos encontram-se disponíveis para os furos das extremidades do acoplamento. Este detalhe mostra a importância de se pensar nos diâmetros das extremidades dos eixos que serão acoplados, pois evita que usinagens posteriores sejam necessárias para adequar

o eixo ao acoplamento.

4.2.4 Projeto de peças

Para as condições de operação esperadas para este manipulador e os carregamentos envolvidos nesse processo, decidiu-se pela utilização de alumínio como material para a fabricação das peças necessárias à interligação dos diversos sistemas da máquina. O alumínio apresenta propriedades de resistência mecânica inferiores a dos aços, porém satisfatórias. A grande vantagem do alumínio é sua massa específica, cerca de um terço da do aço.

O projeto de peças não é uma tarefa simples, envolve muitos aspectos. Os dois principais destes que serão comentados é o projeto para fabricação e o projeto para montagem [Collins 2006].

O projeto para fabricação prevê algumas orientações:

- O número de peças individuais deve ser diminuído;
- Peças de geometria individual devem se acomodar ao processo de fabricação escolhido para minimizar o desperdício de material e tempo;
- As dimensões impostas pela função, formas e combinação de peças na montagem devem ser acrescidas de características geométricas que promovam facilidade de alinhamento, inserção, acesso e posicionamento.

O projeto para montagem deve obedecer alguns princípios:

- Conhecimento do tipo de montagem: manual ou automatizado;
- Configuração das peças para os tipos de processos utilizados na montagem;
- Existência e disponibilidade de ferramentas que auxiliem a montagem.

O processo de fabricação utilizado para as peças será de usinagem em máquina CNC, e o método de montagem será manual. Tendo consciência disso, algumas atitudes e conceitos devem ser tomados:

- A definição de peças com simetria diminui o tempo de programação da usinagem e ajuda a evitar erros posteriores na montagem;

- O acesso aos locais onde as peças serão fixadas é fator importantíssimo. Sendo montagem manual, deve-se considerar se o braço ou mão do montador terá acesso para encaixar uma porca, apertar um parafuso, e outras operações;
- Peças com cantos a 90° tendem a desperdiçar material na usinagem. Dividir esses tipos de peças em duas, contanto que elas possam ser fixadas entre si, é uma boa opção.

Os próximos tópicos citam características das peças projetadas para o manipulador e que refletem cuidados e orientações para ajudar a fabricação, a montagem e a boa funcionalidade do equipamento:

- A fixação de peças de alumínio através de parafusos deve ser feita com cuidado e sem uso de força excessiva, assim como montagens e desmontagens sucessivas dessas peças devem ser evitadas, pois podem danificar a rosca permanentemente;
- Os furos onde serão feitas roscas devem ser preferencialmente passantes, pois facilita o processo de usinagem, além de permitir a retirada do cavaco gerado pelo uso do macho para fazer a rosca;
- Avaliar os comprimentos e diâmetros de parafusos comerciais para projetar o comprimento das roscas onde eles serão fixados, assegurando que o parafuso esteja em contato com o número mínimo de filetes;
- O parafuso não é formado somente por seu corpo, assim, deve-se verificar se haverá espaço para sua cabeça na montagem. Desenhar peças com espaço para alojamento da cabeça é uma boa maneira de evitar esse problema;
- O projeto dos furos por onde passarão parafusos podem conter diâmetros maiores, para permitir ajustes no alinhamento durante a montagem;
- O uso de tolerâncias geométricas deve ser feito somente nas peças onde seja necessário. Caso contrário, somente informe o valor da dimensão. Isso auxilia na montagem e na fabricação das peças, pois para garantir uma tolerância requer-se que a peça seja retirada da máquina muitas vezes para efetuar medições, além disso, no momento de ser desmontada do equipamento pode se danificar, ou seja, só informe tolerância onde for conveniente;
- É importante definir tolerâncias de forma para as peças, com a finalidade que durante a montagem delas não haja aumento de tensões e esforços devido a mau posicionamento ou alinhamento;

- A espessura das peças deve suportar as tensões causadas pelos esforços solicitantes e ter pequena deformação, para não comprometer a precisão da máquina;
- No projeto da máquina, observou-se que a interligação para a transferência de movimento do fuso para a guia, em todos os eixos de translação, se caracterizava o princípio do deslizador longo [Nakazawa 1994]. Segundo este princípio, uma força aplicada fora do eixo de deslocamento da guia (no caso num eixo paralelo a este) gera um momento no elemento móvel da guia, e esse momento gera uma força de atrito que tende a travar o movimento. Esse efeito pode ser reduzido diminuindo a distância de aplicação da força do eixo da guia. Logo, neste manipulador, isso é obtido montando o fuso o mais próximo possível da estrutura (e consequentemente da guia). O projeto de fixação dos fusos foi feito levando isso em consideração, sendo limitado pelas dimensões do motor, o qual ficou muito próximo da estrutura tubular.

4.3 Subsistema eletrônico

Definido como subsistema responsável pelo acionamento da máquina. Tange aos aspectos de dimensionamento de motores, bem como da especificação dos componentes que a ele associam-se.

4.3.1 Dimensionamento dos motores

As variáveis de interesse encontradas, ao fazer o dimensionamento dos motores, são os momentos de inércia do rotor e da carga, os torques gerados pelas forças de atrito e de resistência da água, a aceleração do fuso e o torque do motor.

Aplicando-se o teorema do momento angular na estrutura, o torque no motor é dado pela seguinte equação:

$$T = \alpha(J_r + J_c) + \tau_{e\mu} + \tau_\alpha \quad (1)$$

Sendo α a aceleração angular do fuso, J_r o momento de inércia do rotor, J_c o momento de inércia da carga, $\tau_{e\mu}$ o torque devido ao atrito na guia, τ_α o torque devido à resistência da água ao movimento do transdutor.

A especificação deve ser feito em um processo iterativo. Deve-se levar em conta que cada motor estará responsável por uma carga diferente. Em um primeiro momento,

estimam-se os valores dos momentos de inércia da carga, para cada situação, além de um valor de referência para o momento de inércia do rotor. Assim, desprezando-se inicialmente os torques devido às forças de atrito e resistência, tem-se uma equação relacionando torque e aceleração.

A partir desse ponto, é possível consultar catálogos de fornecedores e verificar quais motores atendem às necessidades do projeto.

A empresa escolhida foi a *Kalatec*, fornecedora usual de motores para o Laboratório e a seguir é apresentada a Tabela 4.8 que relaciona os dados significativos dos motores de passo escolhidos, juntamente com propriedades do manipulador a que estes serão solicitados.

Tabela 4.8 – Propriedades dos motores de passo.

Motor	Movimento	Modelo	Massa (Kg)	Torque (Nm)	Aceleração	J carga	J fuso	J rotor	Torque (Nm)
1	Translação X	HT23 - 400	1,00	1,8	10	1,20E-05	3,00E-05	4,80E-05	1,13
2	Translação Y	HT23 - 397	0,69	1,17	10	6,33E-06	3,00E-05	3,00E-05	0,83
3	Translação Z	HT23 - 397	0,69	1,17	10	3,16E-06	3,00E-05	3,00E-05	0,79
4	Rotação Z	HT23 - 394	0,45	0,5	8	1,58E-06	3,00E-05	1,20E-05	0,44
5	Rotação balanço	HT23 - 394	0,45	0,5	8	6,33E-07	3,00E-05	1,20E-05	0,43

4.3.2 Acionamento dos motores de passo e resolução do sistema

O motor de passo é utilizado quando se pretende controlar a posição em malha aberta. Ele possui enrolamento por bobinas em seu estator e, cada vez que uma das bobinas é alimentada, o motor gira de um ângulo previamente determinado, conhecido como passo do motor.

Os motores de passo comuns possuem, em geral, 200 passos por volta. Porém, é possível dividir o passo do motor em passos menores através da energização combinada de suas fases. Uma das características do modelo **G203V** da fornecedora *Geckodrive*, escolhido para este projeto, é a capacidade de dividir um passo em 10 micropassos, através da energização em forma senoidal das espiras do motor.

Com a utilização desse drive de acionamento no projeto, é possível obter 2000 passos por volta do motor, ou seja, um deslocamento angular de $0,18^\circ$. Para encontrar a resolução da máquina, isto é, o menor incremento linear que pode ser dado nos eixos de translação,

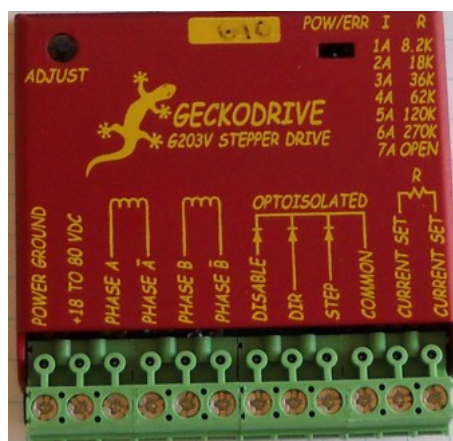


Figura 4.13 – Drive de acionamento utilizado no projeto.

divide-se o passo do fuso de esferas recirculantes pelo número de passos do motor. Como o passo para os três fusos utilizados é de 5 mm, fazendo a conta, chega-se a um valor de resolução de **0,0025 mm** ou **$2,5 \cdot 10^{-6}m$** .

4.3.3 Circuito

O componente principal do circuito é o drive de acionamento dos motores de passo. Ele recebe sinais provenientes do computador e é responsável por alimentar os fios referentes às quatro fases do motor em uma ordem tal que o movimento dos passos seja sincronizado.

Dos vinte e cinco pinos da porta paralela do computador, serão utilizados apenas doze, a saber: cinco pinos de output para enviar a o sentido de rotação aos motores, outros cinco para enviar a informação de clock, um para habilitar os motores e um para aterramento.

Além disso, outros componentes presentes no circuito são um fusível de 15 A para proteção de sobrecarga e duas ventoinhas para ventilação e exaustão. Uma questão importante para a proteção do circuito é colocar todos os terras do circuito na mesma referência, de preferência aterrando-os à carcaça do gabinete.

4.3.4 Gabinete do hardware

Por questões de segurança e praticidade, decidiu-se concentrar todos os componentes elétricos e eletrônicos em um gabinete.

O gabinete é composto por uma caixa metálica modelo DE129 da empresa Taunus,

feita em chapa de aço de 1,2 mm de espessura. Os componentes são fixados em uma placa de montagem em alumínio da mesma fornecedora.

Externamente ao gabinete, encontram-se os seguintes itens:

- Conector DB25, para comunicação paralela entre o microcomputador servidor e os drives de acionamento;
- Chave liga-desliga para energizar o gabinete;
- Conector BNC para disparo da aquisição;
- Conector 2P+T para ligação do gabinete à rede elétrica;
- Botão de emergência.

4.4 Subsistema de software

O subsistema de software do manipulador automático de inspeção pode ser dividido em dois grandes blocos:

- Baixo nível, ou servidor, onde se encontra um sistema operacional em tempo real no qual o software de controle do acionamento dos motores é executado;
- Alto nível, ou cliente, em que de fato ocorre a interface entre usuário final e a estrutura mecânica, bem como a disposição de dados aquisitados.

A divisão nos respectivos blocos se dá especificamente desta maneira à medida que o controle dos motores de passo exige exclusividade de processamento, visando garantir um movimento contínuo e preciso, enquanto a interface de alto nível é submissa ao seu usuário e responsável por processamento e armazenamento de dados.

Encontra-se, no servidor, o pacote LinuxCNC (<http://www.linuxcnc.org>), capaz de controlar diversos tipos de motores de passo conectados a uma interface paralela. Dentre suas diversas funcionalidades, o LinuxCNC processa movimentos em código G (o qual será utilizado neste projeto, para definir a trajetória do mecanismo), estima a posição dos membros de cada eixo em malha aberta, simula trajetórias e executa procedimentos de emergência, funções esperadas de um equipamento de controle numérico comercial, o que, aliado ao fato de ser software livre, torna-o solução excepcional para um projeto de manipulador automático.

Contando com uma *Hardware Abstraction Layer* (*HAL*) configurável através de um arquivo de texto, o LinuxCNC se mostra altamente flexível quanto ao tipo de equipamento que pode ser a ele associado. Tem a capacidade de controlar até nove motores simultaneamente e até mesmo interage com sensores de posição.

Conectando-se ao servidor por meio de uma interface *ethernet*, através de um protocolo semelhante ao *telnet* (especificado por RFC 854), encontra-se o microcomputador cliente. Este conta com um sistema GNU/Linux, no qual a interface de todo dispositivo com o usuário, toma parte.

Foco principal na área de software do projeto, a interface, desenvolvida em C++, deve obedecer a uma série de requisitos, de maneira a proporcionar uma manipulação simples, porém sem perda de generalidade, do manipulador automático de inspeção.

4.4.1 Interface com o usuário

Muito mais do que apenas uma interface gráfica, o software implementado deve ser capaz de prover funcionalidades de execução de movimento, aquisição e manipulação de dados do hardware de ultrassom.

Utilizando a metodologia proposta por [Robinson 2004], os aspectos tangentes ao projeto e desenvolvimento da interface com o usuário podem ser definidos em quatro etapas subsequentes (mas que eventualmente podem ser revisitadas em um processo iterativo):

- Especificações do projeto e dos muitos aspectos envolvidos;
- Busca por soluções;
- Codificação;
- Fase de testes.

Segue-se uma análise de cada uma das etapas.

4.4.1.1 Especificações do projeto

À fase inicial cabe a enumeração e especificação dos requisitos do projeto bem como pesquisa de material relativo ao domínio do software e as restrições sob as quais este está sujeito. Esta etapa é responsável por determinar funcionalidades necessárias e esquematizar o projeto de um ponto de vista comportamental estático. Tem ainda a importância

de orientar o andamento de sua execução: uma vez que todos os requisitos tenham sido transferidos ao código, de maneira ótima, sabe-se que o software foi finalizado.

Quanto às especificações que se referem à interface com usuário, sob o aspecto de desenvolvimento, tem-se:

- Desenvolvimento de software compatível com GNU/Linux, bem descrito em [Kerrisk 2010];
- Uso da linguagem de programação C++, sendo ao código imposto, preferencialmente, o uso do padrão ANSI. Como primeira referência, tem-se [Stroustrup 1997];
- Utilização do toolkit wxWidgets para a criação da interface gráfica, visando compatibilidade com um grande número de interfaces gráficas. Documentação, exemplos e tutoriais encontrados no website do projeto (<http://www.wxwidgets.org>);
- Adoção da ferramenta GDB (The GNU Project Debugger) como depurador dos executáveis gerados, cuja sintaxe e modos de operação são descritos em [Matloff e Salzman 2008];
- Representação de estruturas de software por meio de diagramas UML, os quais têm [Fowler 2004] como referência.

Os requisitos propriamente ditos, neste projeto, são divididos em: casos de uso, os quais determinam as funções que a interface proverá ao usuário, e requisitos gerais, que especificam características importantes do software, mas de impacto secundário à codificação.

Os casos de uso escolhidos no projeto da interface com o usuário são definidos na Figura 4.14.

- *Login*: primeiro item presente no diagrama. Necessário para que se tenha acesso ao servidor. Deve ser efetuado antes que se possa movimentar o dispositivo ou executar tarefas de aquisição.
- *Movimentação*: função de movimento manual, remoto, do mecanismo manipulador. A interface gráfica deve dispor de pelo menos dois tipos de controle de movimento: um que forneça precisão, onde se entra com a posição a ser atingida em cada eixo, e outro de caráter intuitivo, em que determinado eixo seja movimentado enquanto durar a ação do usuário sobre um objeto (botão, por exemplo);

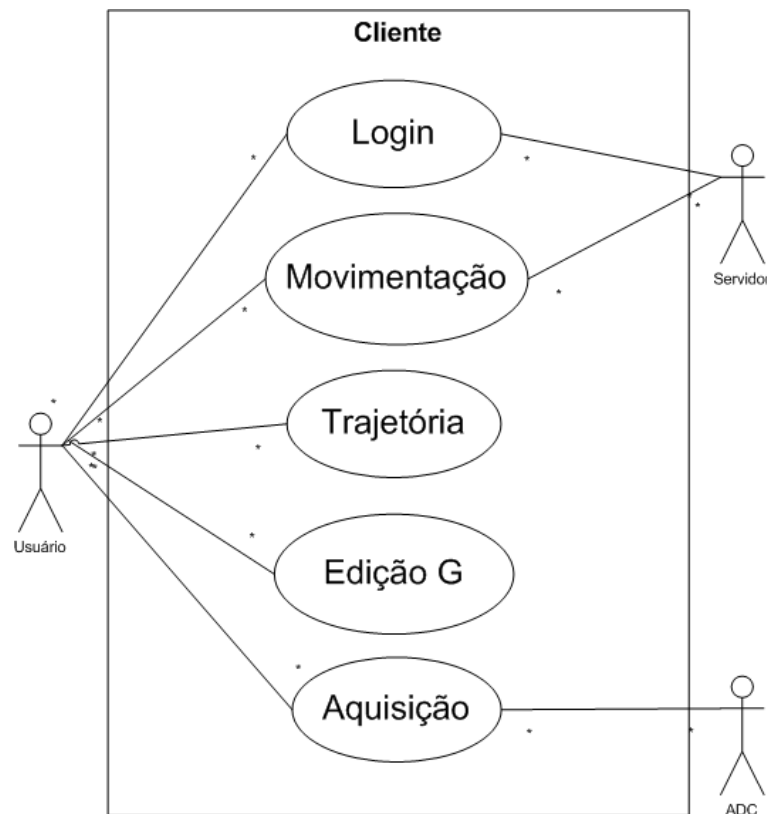


Figura 4.14 – Diagrama UML de casos de uso.

- *Trajetória*: o software deve ser capaz de gerar automaticamente uma trajetória a ser seguida pelo mecanismo e o código G correspondente, uma vez que o usuário indique o tipo de varredura (pontual, linear ou superficial), um par de eixos ativos e a respectiva orientação, além de uma série de parâmetros de varredura (distância entre os pontos de aquisição, número de linhas, ou pontos, distância entre linhas);
- *Edição G*: implementação de um pequeno editor de código G com capacidades de verificação de sintaxe e facilidades de edição;
- *Aquisição*: obtenção de dados de varredura a partir do osciloscópio Este caso de uso toma parte uma vez que a operação automática do manipulador se inicia. Representa também a capacidade de salvar dados obtidos em disco, obedecendo a um formato especificado.

De acordo com os requisitos gerais, o software deve ser capaz de:

- Salvar e carregar os parâmetros e preferências utilizados em dada sessão;
- Prover documentação de cada funcionalidade agregada;

- Apresentar comando especial para parada de movimento de emergência;
- Prover ferramenta de caráter intuitivo ao usuário.

4.4.1.2 Busca por soluções

Uma vez que o projeto de software é uma tarefa notavelmente abstrata [Brooks 1986], mais do que a tentativa de buscar e enumerar infindáveis estruturas possíveis, torna-se mais sensato determinar, a princípio, um comportamento dinâmico que o programa deve obedecer de maneira geral.

Volta-se ao funcionamento do sistema em alto nível, demonstrando o encadeamento entre os processos presentes. No caso de um software a eventos discretos, uma boa descrição pode ser obtida por um diagrama de estados UML.

O diagrama da Figura 4.15 ilustra de maneira simbólica o comportamento do software proposto.

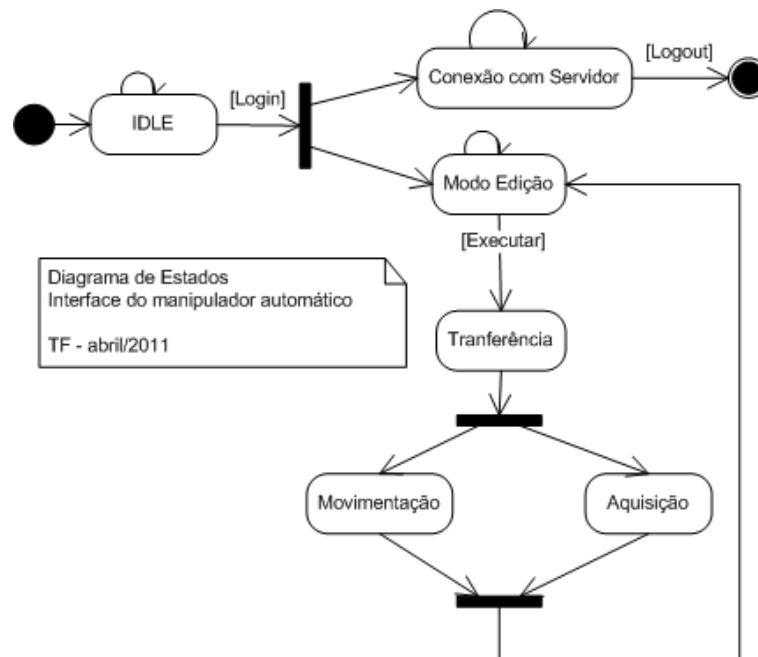


Figura 4.15 – Diagrama de estados do software.

O programa se inicia em um estado de espera. Assim que o login é efetuado, a conexão com o microcomputador servidor é estabelecida. Simultaneamente, o software entra no modo edição, em que é permitido ao usuário posicionar o mecanismo e definir uma trajetória de varredura manual, ou automaticamente. Assim que o operador tenha

configurado a máquina com sucesso, o mecanismo é capaz de executar o movimento. Quando tal operação é requisitada, inicialmente a interface envia o programa em código G e a seguir pede ao servidor que sua execução seja iniciada.

Durante o processo de execução automática de movimento, inicia-se a aquisição de dados. O sinal do transdutor ultrassônico, digitalizado pelo osciloscópio, é obtido e salvo em arquivos. Assim que o programa G é finalizado, o software retorna ao modo de edição.

4.4.1.3 Aprofundamento do modelo escolhido

Uma vez que já se obteve uma estrutura comportamental abstrata a ser seguida, começa-se a definir o programa sob o ponto de vista estrutural. É o que [Robinson 2004] denomina “modularização”, determinando o critério utilizado para se dividir tarefas entre classes e sua aplicação.

O primeiro paradigma que se pode considerar a respeito de como se deve organizar o código-fonte é em blocos funcionais, com classes e métodos que implementam um requisito de maneira completa. Esta estrutura é chamada de *top-down*. Apesar de ser intuitiva e tradicionalmente utilizada, peca no sentido em que o código é passível de modificações futuras e sua estrutura deve ser planejada, sobretudo para minimizar o impacto dessas possíveis alterações. Um princípio mais interessante a ser utilizado é o *Information Hiding*, o qual tende a isolar blocos críticos do software (aqueles que lidam com estruturas de dados, com o usuário, e os que se sabe que sofrerão mutação).

Uma ferramenta interessante para a modelagem desta etapa é o diagrama de classes UML. Pode-se utilizá-lo em vários níveis de abstração, podendo, por exemplo, o diagrama de estados anteriormente apresentado ser rapidamente traduzido em um conjunto de classes representando estados e uma classe adicional que controla as possíveis transições.

Um modelo inicialmente proposto de modularização do projeto é dado pelo diagrama da Figura 4.16.

O programa é iniciado quando o sistema operacional passa o controle para a *Main-Class*, a qual cria e mostra a janela da interface gráfica, inicializa o módulo de configuração. Esta classe obedece aos padrões de classe de aplicação wx, descende da classe *wxApp* e já inclui algumas bibliotecas do wxWidgets. Não é necessária a criação de uma função *main*, vez que esta é automaticamente criada pela macro *IMPLEMENT_APP*. E grande parte do código contido nessa classe encontra-se no evento *OnInit* da aplicação.

Derivando diretamente de uma classe principal (*MainClass*), encontra-se a classe *EventHandler*, a qual é a classe pai de todas as abas associadas aos requisitos do projeto, bem como controladora das funcionalidades de uso global do software. É também responsável por tratar dos eventos da interface gráfica.

A *EventHandler* é responsável por guardar e alterar o estado em que a máquina de estados do sistema se encontra, habilitando e desabilitando itens específicos quando necessário, bem como informando alguns tipos de erros ao usuário. Quando no estado IDLE, a classe é responsável por atualizar as labels de status do software, no estado conectando, é cuida da criação de uma classe *Connection* e da autenticação. Na desconexão, destrói a *Connection* e desabilita as funções de atuação remota do software.

Vale ressaltar a maneira como a associação de eventos ocorre neste módulo: cada classe de janela, aba, ou similar define um *call-back* para seus eventos específicos. Este *call-back*, por sua vez, agrupa os parâmetros necessários para o processamento da requisição atual e chama a correspondente função (definida virtual) contida em *wxInterface* (cuja descrição encontra-se nos itens subsequentes). Cada função virtual é redefinida pela *EventHandler* (de quem *wxInterface* é superclasse), a qual processa o evento, e, se necessário, atua sobre o objeto gerador de eventos por seus métodos getters, ou setters, ou ainda, diretamente sobre suas funções.

A classe *EventHanlder* associa-se a:

- *wxInterface*: classe mapeadora de eventos. Cria uma interface utilizada para as tabs da janela do software sejam capazes de utilizar a classe *EventHandler*.
- *wxJogPage* (Figura 4.17): classe da tab de jogging, em que o usuário é capaz de mover o mecanismo de maneira manual, movimentando um ou mais eixos por vez com a velocidade especificada. O movimento pode ocorrer clicando-se individualmente nos botões “+” e “-” de cada eixo e especificando-se um delta respectivo, ou colocando-se valores de deslocamento nas *spinBoxes* de distância, clicando nas *checkboxes* respectivas, e a seguir em “Mover”.

Nesta aba, ainda são mostrados registradores de status de posição de eixos, de funcionamento da máquina e de parada de emergência. Pode-se ainda ligar a máquina, ou acionar a parada de emergência nesta seção do software.

- *wxTrajPage* (Figura 4.18): classe da tab de geração de trajetórias. A partir dos parâmetros de entrada, esta passa o controle para a classe *PlanTrajectory*, a qual gera automaticamente o código G da trajetória a ser seguida pelo mecanismo. A



Figura 4.17 – wxJogPage.

classe mostra um perfil generalizado de como o movimento deve ocorrer e conta com algumas funcionalidades adicionais relativas à geração de código G, envio do mesmo ao servidor e ativação do programa criado no servidor.

- wxGraph (Figura 4.19): classe da tab de Análise (de aquisição). É responsável por mostrar uma plotagem (contínua, ou não) quando um teste é solicitado pelo usuário.
- wxConnPage (Figura 4.20): classe da tab de comunicação. É responsável por definir o servidor da máquina, a porta de conexão, bem como iniciar a comunicação efetivamente. Também controla o servidor remoto de arquivos.
- wxPlayPage (Figura 4.21): classe da tab de Execução de código G. Provê as funcionalidades de seleção e execução do código solicitado.
- wxWin: classe da janela principal e classe pai da *EventHandler*.

Dentre os blocos funcionais específicos, tem-se:

- Connection: responsável por criar, manter e terminar a conexão entre o microcomputador servidor e cliente, contando com funções de envio e recebimento de dados.

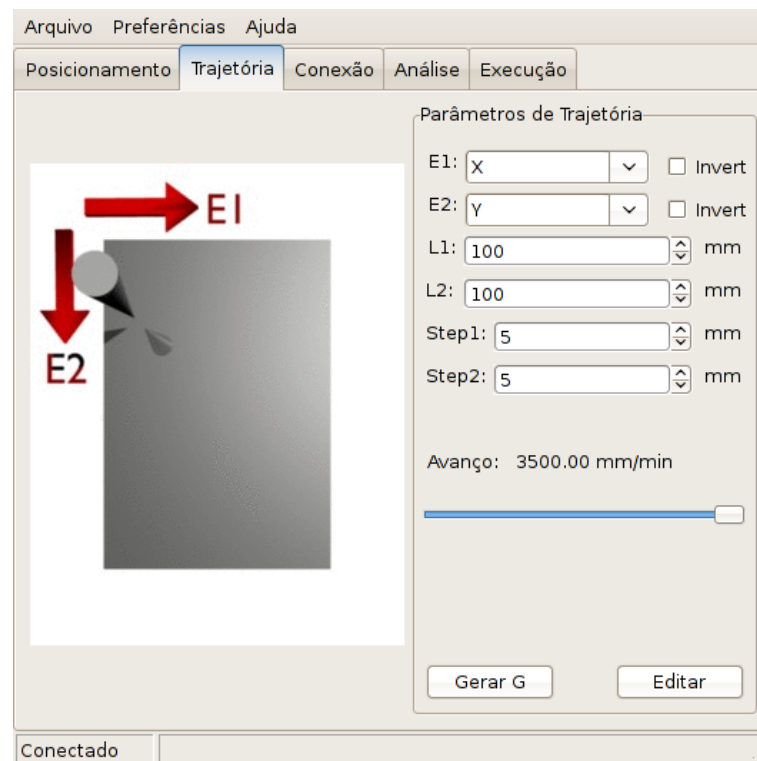


Figura 4.18 – wxTrajPage.

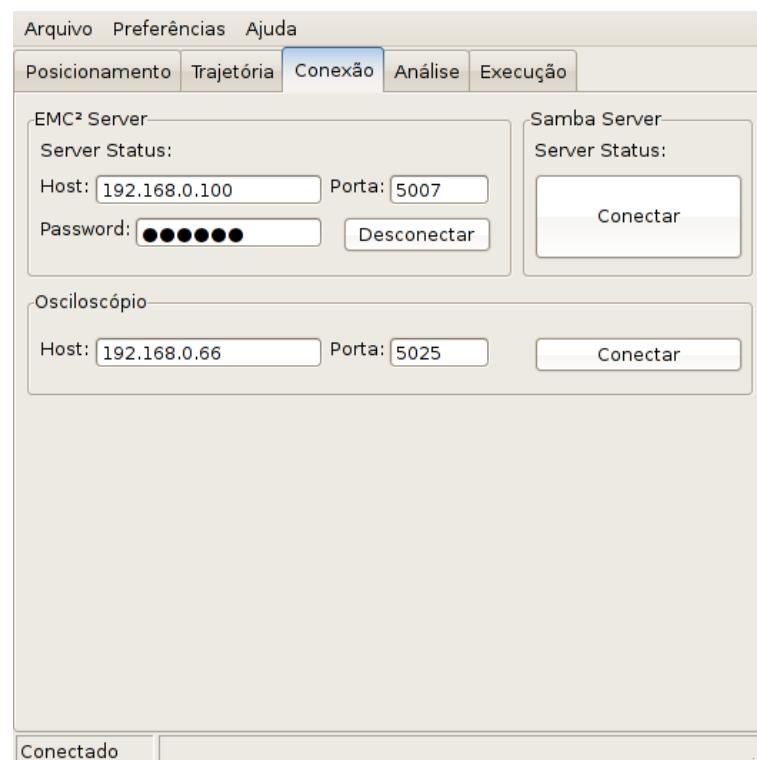


Figura 4.19 – wxGraph.

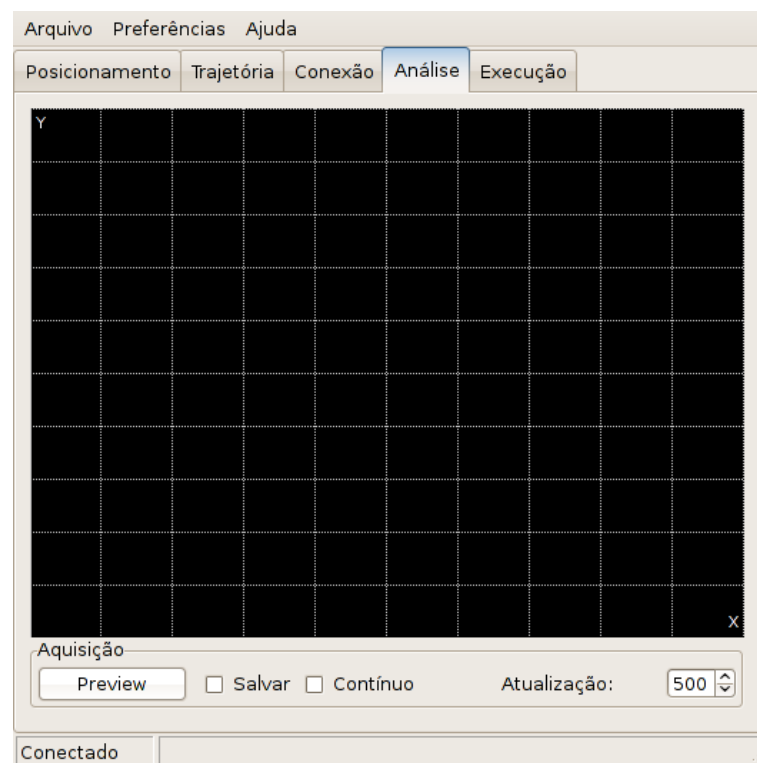


Figura 4.20 – wxConnPage.

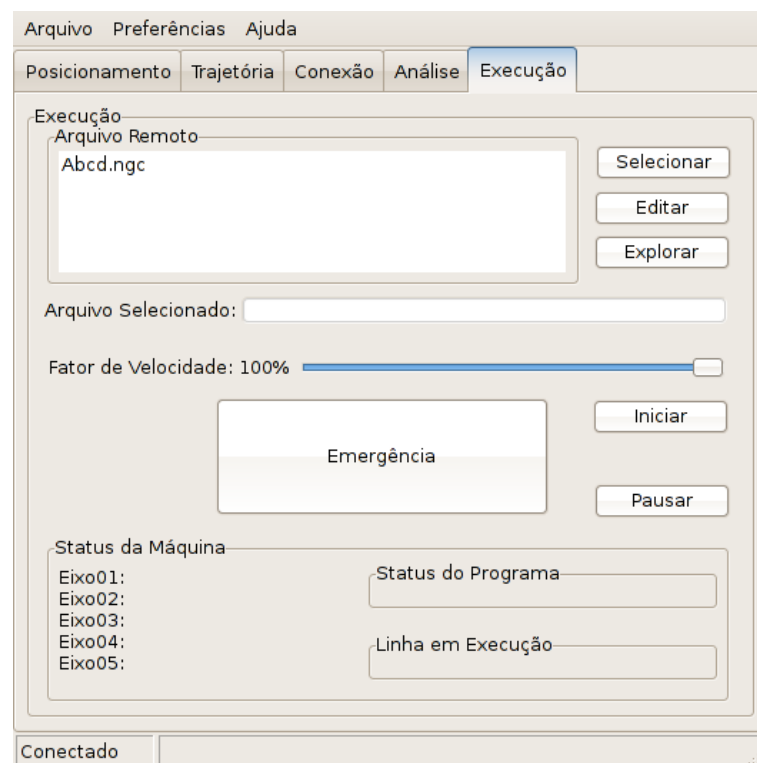


Figura 4.21 – wxPlayPage.

É, na realidade, um *wrapper* para o cliente telnet padrão do sistema, implementado através da criação de uma *thread* e de uma comunicação IPC por meio de *pipes*.

Essa classe é de uso amplo e não generalizada para uso com o *LinuxCNC*;

- **Trigger:** trecho do código que efetua a sincronização entre software cliente, servidor e osciloscópio.
- **ErrorHandling:** com o caráter de componente de *framework*, é utilizada por todos os demais componentes do projeto. É capaz de processar erros, exibindo-os no canal selecionado (gráfico ou terminal) e implementa funcionalidades de depuração do projeto.
- **Classes de Configuração:** classes disponíveis por qualquer outra classe, responsável por carregar as configurações utilizadas pelo software a partir de um arquivo e mapear cada item numa variável específica, provendo funcionalidades de leitura e escrita da maneira mais transparente possível. O arquivo de configuração é um *xml* desenvolvido como o exemplo da Figura 4.22. As propriedades necessárias são inseridas, seus correspondentes, adicionados por script no código do projeto e, em tempo de execução, após parseadas pela classe *XmlProps*, estão disponíveis dentro do software como variáveis, cada uma mapeada em uma classe template do tipo *CFGProperty*, capaz de lidar com informação do tipo inteiro(*int*), booleano(*bool*), ou ainda string(*string*). A propriedade “caption”, por exemplo, pode ser acessada através de:

configuration.getInstance()—>*Main.caption.getValue()*;

E seu valor, alterado com o operador “=”, sobrecarregado nas classes de propriedade.

Vale ressaltar que cada vez que novas propriedades são inseridas no arquivo xml, o software “create_props” deve ser rodado para remapear as propriedades nos arquivos config.cpp e config.h, e ainda, que o build do software automaticamente se encarrega deste processo.

4.4.1.4 Programação

Após a conclusão das etapas de planejamento, inicia-se a etapa de programação. Essa se desenvolve de maneira a manter o código-fonte o mais conciso e funcional possível, obedecendo a *design patterns* conhecidos e efetivos.

```

<?xml version="1.0"?>
<config>
  <Main>
    <XO type="int">10</XO>
    <YO type="int">10</YO>
    <width type="int">530</width>
    <height type="int">530</height>
    <caption type="string">IFACETF2011</caption>
  </Main>
  <EventHandler>
    <AxisNames type="string">XYZAB</AxisNames>
  </EventHandler>
  <TrajPage>
    <Image1 type="string">movieNN.gif</Image1>
    <Image2 type="string">movieNI.gif</Image2>
    <Image3 type="string">movieIN.gif</Image3>
    <Image4 type="string">movieII.gif</Image4>
  </TrajPage>
  <ConnPage>
    <Host type="string">192.168.0.171</Host>
    <Port type="int">5007</Port>
    <EMCPassword type="string">EMCT00</EMCPassword>
  </ConnPage>
</config>

```

Figura 4.22 – Exemplo de arquivo de configuração.

A explanação imediata do software da interface com o usuário é feita através do *Doxygen* (<http://www.doxygen.com>), ferramenta de geração automática de documentação.

O *build* é automatizado por meio do *make*. Amplamente utilizado, o software *make* automatiza processos (de compilação, ou não), executando espécies de scripts chamados de *Makefiles*. Tem ainda a vantagem de compilar somente código alterado, mantendo intocadas as bibliotecas já atualizadas, de maneira que apresenta vantagem em tempo de execução e processamento sobre o processo análogo executado manualmente.

4.4.1.5 Testes

Tendo em mente a criação de um software consistente, a fase de testes deve ser executada de maneira paralela à codificação do projeto.

Inicialmente, cada componente deve incluir rotinas de teste, ou scripts de depuração, os quais verificam a capacidade da unidade de cumprir os requisitos esperados, bem com sua estabilidade diante de condições adversas. São estes conhecidos como testes unitários.

Em outro nível, à medida que os blocos são integrados, é necessário que se verifique se a interação destes ocorre corretamente, se dados são corretamente interpretados e processados por cada uma das partes e se há a possibilidade de estados indesejados tomarem

parte do processo.

Por fim, os chamados testes de sistema são executados. Nesses se verifica se o sistema atende satisfatoriamente a todas as especificações. Situações são exaustivamente executadas em busca de eventuais pontos a serem corrigidos ou melhorados.

No projeto em questão, não se planeja a utilização de nenhuma ferramenta comercial de teste, mas de rotinas programadas juntamente ao código-fonte propriamente dito, ou scripts correspondentes.

Vale notar que mesmo provada a integridade de um trecho de programa, é interessante que as funcionalidades dos testes individual ou de integração sejam mantidas como referências futuras, provendo fácil detecção de bugs em estágios posteriores do projeto.

4.4.2 Integração

Como desafio de qualquer projeto, encontra-se a integração dos subsistemas componentes, harmoniosamente, de maneira a se constituir a unidade.

Após a idealização de todo aspecto de software, chega-se ao diagrama de blocos refinado (Figura 4.23), o qual consegue representar de maneira elucidativa o aspecto conceitual do produto desenvolvido. Aquilo que se discutiu até o presente momento foram

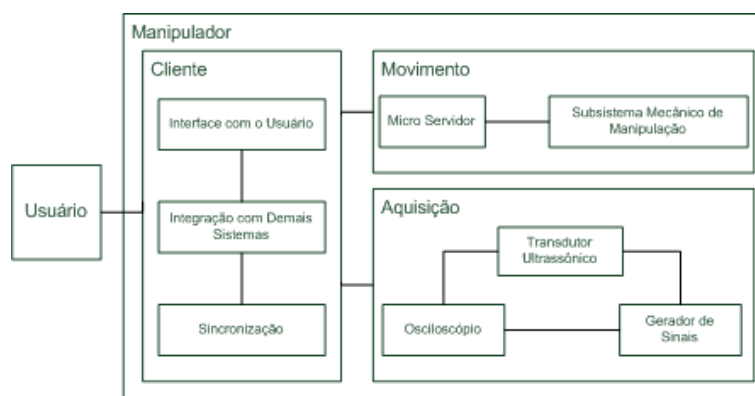


Figura 4.23 – Diagrama de blocos do projeto.

os detalhes relacionados com a implementação dos blocos do “Cliente” e de “Movimento”. Nesta seção de consolidação, cabe o aprofundamento nos blocos de “Aquisição” e “Sincronização”.

4.4.2.1 Aquisição

A varredura por ultrassom ocorre por meio de um transdutor, o qual, quando excitado eletricamente, gera uma onda mecânica, que por sua vez propaga-se através do meio no qual está em contato. O sinal, após atravessar o objeto de estudo, pode ser readquirido (refletido) pelo mesmo transdutor, ou pode ser obtido (transmitido) por meio de outro.

No presente trabalho a aquisição do sinal, ocorrendo de qualquer um dos modos apresentados, dá-se por um osciloscópio digital, o qual pode ser remotamente operado através de um protocolo de instrumentação (que permite a entrada de comandos, os quais podem retornar dados). Conectado na rede local (*ethernet*), o equipamento provê a digitalização dos dados recebidos pelo transdutor ultrassônico.

Vale notar que o software desenvolvido captura exatamente a exibição da tela do osciloscópio, sendo do encargo do operador a prévia configuração do mesmo.

4.4.2.2 Sincronização

Visando garantir a consistência entre movimento e aquisição de dados, imprescinde-se de uma maneira de coordenar os subsistemas envolvidos, tomando lugar a sincronização.

De maneira parcialmente autônoma, para o servidor, a sincronização é efetuada a partir dos arquivos código G. Após efetuarem qualquer movimento de varredura, devem solicitar que o interpretador espere até que a aquisição ocorra com sucesso (M100) para que novo movimento ocorra.

No cliente, cada vez que o servidor efetua um movimento, é solicitada, por meio de um *signal*, a execução de uma aquisição. O respectivo pedido é passado ao osciloscópio, o qual devolve a digitalização do sinal de ultrassom na posição pedida, que, por sua vez é salvo no arquivo especificado.

Do ponto de vista programacional, a sincronização é implementada por meio de comunicação interprocessual remota:

- O software do servidor “desbloqueia” a rotina de aquisição do cliente, e bloqueia seu próprio funcionamento;
- A rotina de aquisição executa o que lhe é solicitado e bloqueia a si própria até nova requisição, desbloqueando o servidor.

5 *Resultados*

5.1 Sistema mecânico

Após a especificação dos componentes e desenhos de todas as peças em software de CAD, foram gerados os desenhos de fabricação para posterior usinagem, cujo resultado será mostrado em seguida. A ilustração da máquina completa é apresentada na Figura 5.1.

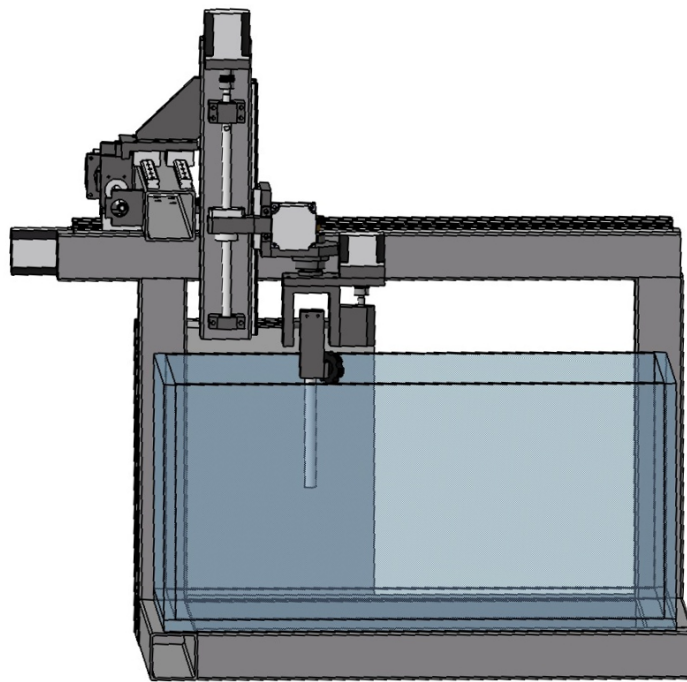


Figura 5.1 – Ilustração do manipulador em perspectiva.

Na figura, pode-se observar a estrutura em “C” com mesa fixa e o tanque apoiado sobre a parte inferior desta. É possível observar os suportes dos motores de passo, o deslocamento das mesas sobre as guias e a fixação dos mancais nos perfis. Desenhos mais detalhados da conexão entre a castanha do fuso e as mesas deslizantes podem ser encontrados no apêndice, onde desenhos de conjunto para cada grau de liberdade são apresentados. Na Figura 5.2, é exibido um desenho em detalhe do conjunto giratório do

mecanismo.

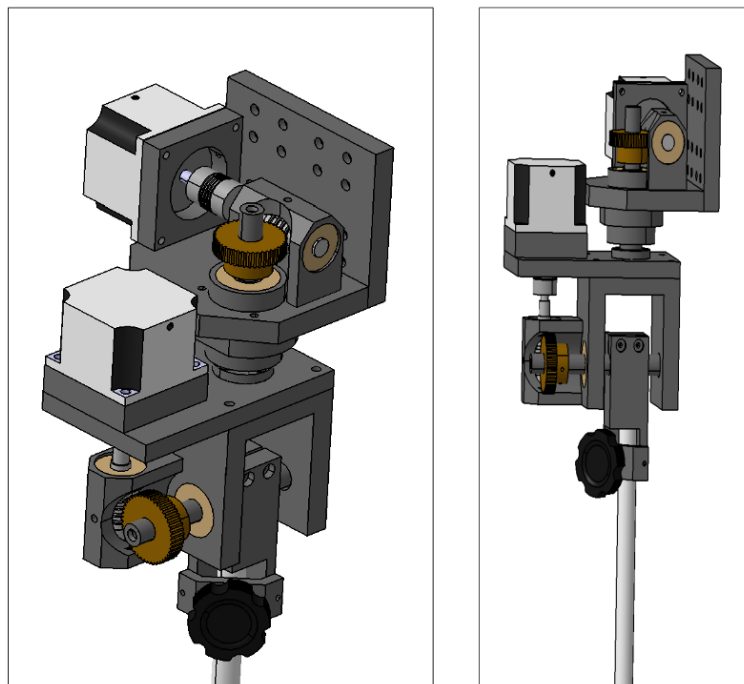


Figura 5.2 – Detalhes do conjunto giratório.

É possível observar como se dão os movimentos de rotação. O motor de passo superior movimenta, através de um acoplamento elástico, um sem-fim, que está suportado por dois rolamentos. Este, ao rotacionar, gira engrenado com uma coroa. Através de um mancal central, com seu eixo alinhado na vertical, todo o conjunto inferior gira solidário ao movimento da coroa, configurando o primeiro grau de liberdade de rotação.

O segundo grau de liberdade é projetado de forma semelhante. A rotação do segundo motor de passo é transferida a um segundo parafuso sem-fim, que faz par com uma coroa posicionada na horizontal. O eixo desta coroa proporciona um movimento de “balanço” na haste que contém o transdutor. A haste é fixada ao mecanismo através de uma manopla que fornece o aperto necessário para sua estabilidade.

5.2 Sistema eletrônico

O gabinete de hardware, contando com os respectivos driver, fonte, entradas e saídas de sinais, foi montado.

Como se pode observar na Figura 5.3, através de um conector DB25, chega a cada drive de acionamento dois sinais (direção e passo) provenientes da porta paralela do

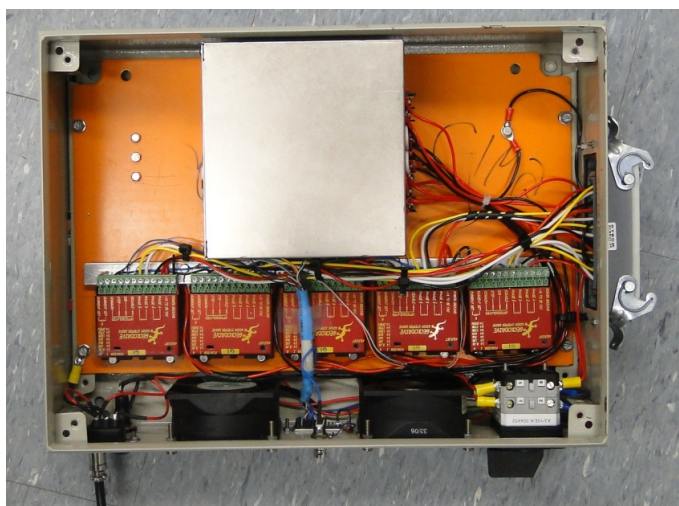


Figura 5.3 – Interior do gabinete do hardware.

computador, além do sinal de enable que é comum a todos. A saída de cada drive são quatro fios que energizam os motores de passo utilizados na configuração em série.

A vista por fora do gabinete é apresentada na Figura 5.4. Os componentes de destaque são as ventoinhas, para ventilação e exaustão do ar interior, a chave liga-desliga, o conector de força e o botão de emergência, que possui um cabo extensível de dois metros de comprimento.



Figura 5.4 – Exterior do gabinete.

5.3 Sistema de software

Após a correta codificação, configuração e instalação de todo software necessário, bem como dos testes unitários e de integração, tem-se em mãos toda uma primeira versão do sistema necessário ao funcionamento do manipulador. Desta, certamente haverá correções necessárias até que se chegue a um software limpo e efetivo em sua plenitude.

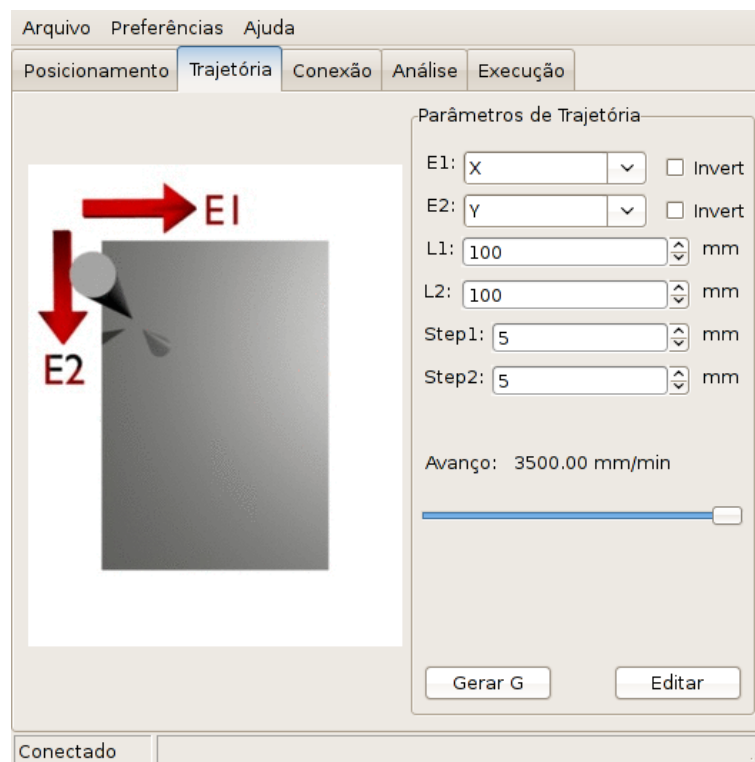


Figura 5.5 – Janela wxTrajPage do software.

O que se segue é o processo de teste em campo, avaliando e melhorando o software de maneira contínua e incessante junto àqueles que dele farão uso, capturando a verdadeira essência da criação de softwares: “os requisitos vão mudar”.

5.4 Integração e objetivos alcançados

A integração dos subsistemas foi realizada com sucesso, sem que grandes obstáculos aparecessem. Isso se deve ao fato de as partes terem sido testadas previamente com os recursos disponíveis. Mesmo antes do término da construção mecânica, já era possível testar a interface com o usuário, a comunicação ethernet e inclusive o controle dos motores, sendo este validado com a estrutura do manipulador antigo presente no laboratório. A

Figura 5.6 ilustra a construção do manipulador de varredura.

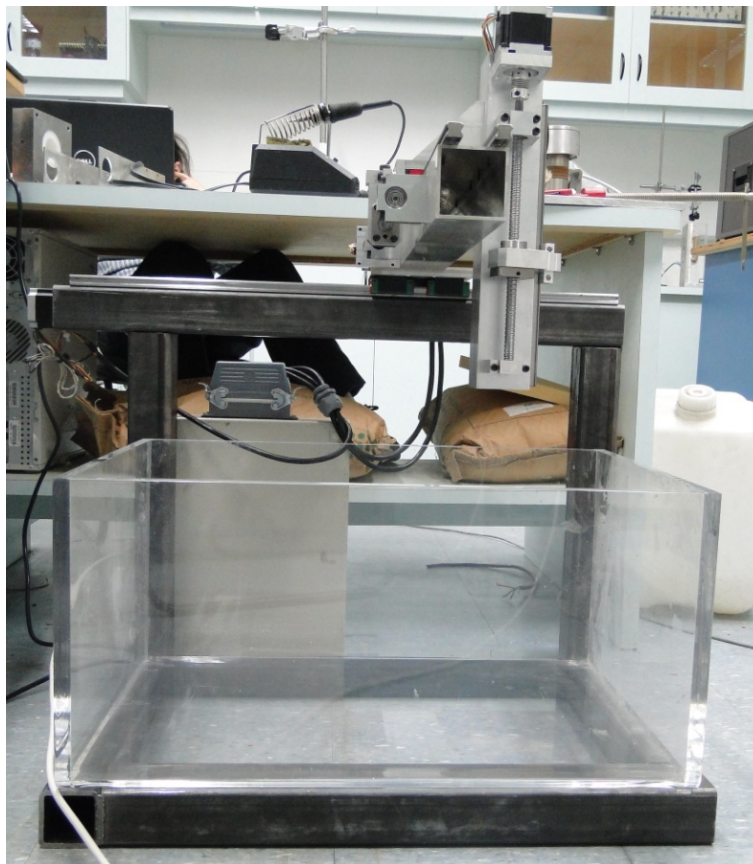


Figura 5.6 – Manipulador em fase final de construção.

É possível concluir que o requisito de fácil acesso ao tanque e ao transdutor foi obedecido. Quanto ao volume de trabalho, o que se obteve (vide Tabela 5.1) foi $0,05 \text{ m}^3$, o que representa 67,5% do volume do tanque como área útil.

Tabela 5.1 – Características do equipamento.

Item	Valor
Massa	55kg
Dimensões	830 x 800 x 520 mm
Volume de trabalho	600 x 350 x 250 mm
Potência	250 W
Volume do tanque	$0,074 \text{ m}^3$

Conclui-se, também, que o objetivo de construir uma máquina compacta foi alcançado, visto que todas as dimensões são inferiores a um metro. A massa de 55 kg não pode ser considerada leve, mas a máquina não será reposicionada com frequência, apenas quando houver necessidade de uma configuração diferente no laboratório.

6 *Conclusões*

6.1 *Conclusões*

Este trabalho apresentou o projeto de um sistema automático de varredura por ultrassom, a ser utilizado no laboratório de ultrassom do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos (PMR) da Escola Politécnica da USP.

Aqui, foi projetado um manipulador de dimensões compactas para atender às necessidades do laboratório. Foi proposta uma nova solução para os graus de liberdade de rotação do mecanismo. Além disso, foi implementado um novo sistema de controle, aquisição de dados e interface com usuário. Devido a suas inovações, esse sistema será utilizado também no outro manipulador já presente no laboratório.

A utilização do software de CAD CATIA V5 para o desenho do conjunto e análise a partir do método dos elementos finitos (MEF) pode ser citada como de extrema utilidade, por facilitar o dimensionamento e desenho das peças e permitir análises estruturais que confirmam a validade da solução adotada. Outra ferramenta facilitadora do trabalho, que fica como recomendação para trabalhos futuros, é a utilização do software de código aberto *EMC2*, da *LinuxCNC*, por sua facilidade de uso e eficiência no controle da máquina.

Por se tratar de uma máquina de precisão a ser utilizada como instrumento de trabalho e de pesquisa, certas decisões de material e equipamento foram tomadas privilegiando a eficiência da máquina e não seu custo. Por outro lado, o orçamento para este projeto esteve longe de ser comparável a máquinas de precisão que almejam precisões de centésimos de milímetros, cujos valores chegam a centenas de milhares de reais.

Após a compra dos perfis tubulares, percebeu-se que os mesmos não apresentam tolerâncias dimensionais e geométricas - como planicidade e perpendicularidade - satisfatórias para máquinas de precisão. Este fato prejudicou de certa forma o alinhamento dos conjuntos de transmissão. Assim, a precisão de posicionamento esperada para o manipulador, da ordem de centésimos de milímetros, não pôde ser obtida. A precisão

alcançada é da ordem de décimos de milímetros. Recomenda-se, então, a usinagem de canais retangulares no perfil, para que o apoio das peças se dê em uma superfície plana. Estes devem ser feitos para cada peça que esteja em contato direto com os perfis, no caso deste projeto, para as guias lineares, os mancais do fuso, os suportes dos motores e a mão francesa (conexão entre mesa do eixo Y e perfil tubular do eixo Z).

No projeto mecânico, uma sugestão adicional para melhorar a estética de equipamentos que utilizam perfis tubulares como elemento estrutural é o corte dos perfis a um ângulo de 45° . Dessa forma, pode-se esconder os vãos dos perfis, abertos nas pontas, ao se encaixar os tubos formando ângulos retos. Essa opção não dificulta o processo de soldagem dos tubos.

Os requisitos de construção do manipulador - estrutura compacta, acesso simples ao transdutor e espaço de trabalho útil no tanque - foram cumpridos com sucesso. As características funcionais, inspeção em dois eixos, movimentação manual e monitoramento pelo usuário, também foram contempladas satisfatoriamente. Por fim, conclui-se que a integração entre os subsistemas foi realizada de acordo com o esperado.

Referências

- [Adamowski, Buiochi e Matuda 1995]ADAMOWSKI, J. C.; BUIOCHI, F.; MATUDA, M. Y. **Sistema computadorizado para mapeamento de campo acústico**. In: ABENDE. *XIV CONAEND - Congresso Nacional de Ensaaios Não Destrutivos*. Rio de Janeiro, 1995.
- [Albuquerque et al. 2004]ALBUQUERQUE, J. A. G. et al. **Transdutores de Ultrassom: modelagem, construção e caracterização**. In: ALPHAMIDIA ASSESSORIA FONOGRÁFICA. *Sensores: Tecnologias e Aplicações*. São Paulo, 2004. p. 1–44.
- [BIOACUSTICS RESEARCH LAB 2012]BIOACUSTICS RESEARCH LAB. **The DAEDAL Acquisition System**. 2012. Illinois, EUA. Disponível em: <<http://www.brl.uiuc.edu/Facilities/>>. Acesso em: 08 fev. 2012.
- [Brites e Santos 2008]BRITES, F. B.; SANTOS, V. P. A. **Motor de Passo**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2008. 15 p. Disponível em: <<http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais>>. Acesso em: 16 mar. 2012.
- [Brooks 1986]BROOKS, F. P. **No Silver Bullet - Essence and Accident in Software Engineering**. Chapel Hill: University of North Carolina, 1986.
- [Buiochi 2010]BUIOCHI, F. **Aplicações de técnicas de ultrassom**. 2010. Tese (Livredocência) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- [Buiochi et al. 2011]BUIOCHI, F. et al. **Ultrasonic system for automatic detection of disbonds in composite tube joints**. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS. *International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2011(21. : 2011 : Natal, RN)*. Anais, Rio de Janeiro, 2011. p. 1–9.
- [Collins 2006]COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de elementos de máquinas: uma perspectiva de prevenção da falha**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 760 p.
- [Deutschman, Michels e Wilson 1975]DEUTSCHMAN, A. D.; MICHELS, W. J.; WILSON, C. E. **Machine Design: theory and practice**. New York: Macmillan Publishing Co, 1975. 772 p.
- [Fowler 2004]FOWLER, M. **UML Distilled Third Edition: A Brief Guide to the Standard Object Modelling Language**. Boston: Addison-Wesley, 2004. 159 p.
- [FreioMix 2012]FREIOMIX. **Acoplamentos de Fole sem Folga**. 2012. Disponível em: <<http://www.freiomix.com.br/acfole.asp>>. Acesso em: 17 mar. 2012.
- [GE-MCS 2012]GE-MCS. **General Electric Measurement & Control**. 2012. Disponível em: <<http://www.ge-mcs.com>>. Acesso em: 18 mar. 2012.

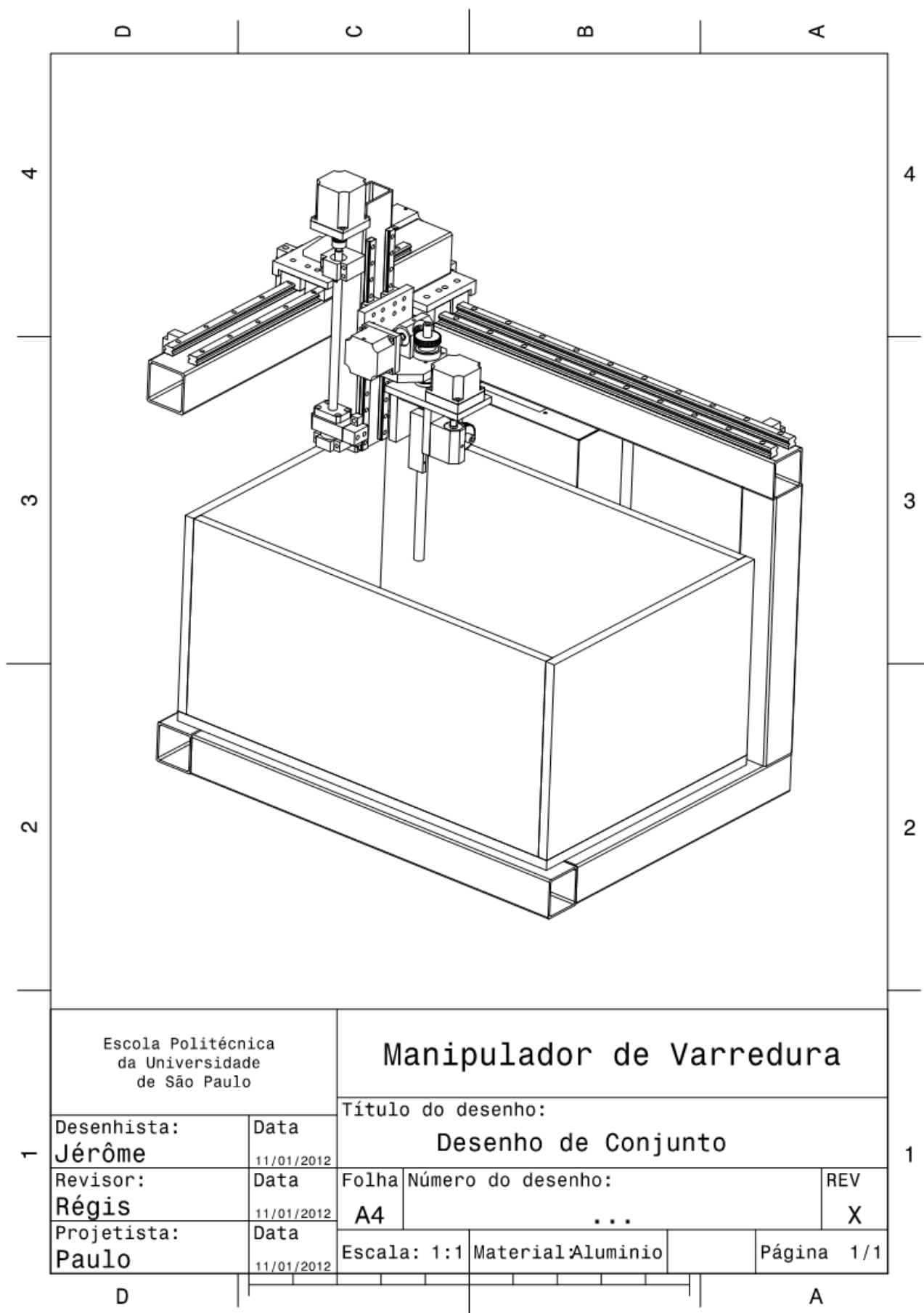
- [Hiwin 2008]HIWIN. **Linear guideway:** technical information. 2008. Disponível em: <[www.hiwin.com.tw/download/tech_doc/gw/Linear%20Guideway-\(E\).pdf](http://www.hiwin.com.tw/download/tech_doc/gw/Linear%20Guideway-(E).pdf)>. Acesso em: 18 mar. 2012.
- [Hiwin 2010]HIWIN. **Ballscrews:** technical information. 2010. Disponível em: <[www.hiwin.com.tw/download/tech_doc/bs/Ballscrew-\(E\).pdf](http://www.hiwin.com.tw/download/tech_doc/bs/Ballscrew-(E).pdf)>. Acesso em: 17 mar. 2012.
- [Horikawa 2011]HORI KAWA, O. **Guias lineares e redutores.** 2011. Notas de aula da disciplina PMR2530 – Mecânica de precisão.
- [Kalatec 2012]KALATEC. **Acoplamentos Flexíveis.** 2012. Disponível em: <<http://www.kalatec.com.br/index.php/produtos/acessorios/acoplamentos.html>>. Acesso em: 7 jan. 2012.
- [Kerrisk 2010]KERRISK, M. **The Linux Programming Interface: A Linux and UNIX System Programming Handbook.** San Francisco: No Starch Press, 2010. 1506 p.
- [Manutenção e Suprimentos 2012]Manutenção e Suprimentos. **Guias Lineares.** 2012. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/segmento/guias-lineares/>>. Acesso em: 17 mar. 2012.
- [MARIETTA NDT 2012]MARIETTA NDT. **Marietta Nondestructive Testing Inc..** 2012. USA. Disponível em: <<http://www.marietta-ndt.com>>. Acesso em: 18 mar. 2012.
- [Matloff e Salzman 2008]MATLOFF, N.; SALZMAN, P. J. **The Art of Debugging:with GDB, DDD and Eclipse.** San Francisco: No Starch Press, 2008. 264 p.
- [Mec Parts 2012]Mec Parts. **Movimentação linear.** 2012. Disponível em: <<http://www.mecparts.com.br/6201.html>>. Acesso em: 02 mar. 2012.
- [Nakazawa 1994]NAKAZAWA, H. **Principles of Precision Engineering.** USA: Oxford University Press, 1994. 117–130 p.
- [OBR Equipamentos Industriais Ltda 2012]OBR Equipamentos Industriais Ltda. **Eixos e rolamentos lineares.** 2012. Disponível em: <<http://www.obr.com.br/guias-cilindricas.html>>. Acesso em: 17 mar. 2012.
- [PARKER AUTOMATION 2003]PARKER AUTOMATION. **Tecnologia Eletromecânica - Apostila 1600.231.01 BR.** 2003. 58 p.
- [Robinson 2004]ROBINSON, J. A. **Software Design for Engineers and Scientists.** York: University of York, 2004. 414 p.
- [Sanches 2009]SANCHES, J. M. **Desenvolvimento de uma fresadora CNC de baixo custo para fins didáticos.** 96 p. Tese (Doutorado) — Escola De Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2009.
- [Santos 2010]SANTOS, M. G. H. **Desenvolvimento de transdutores piezelétricos de ultrassom para formação de imagens.** 2010. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

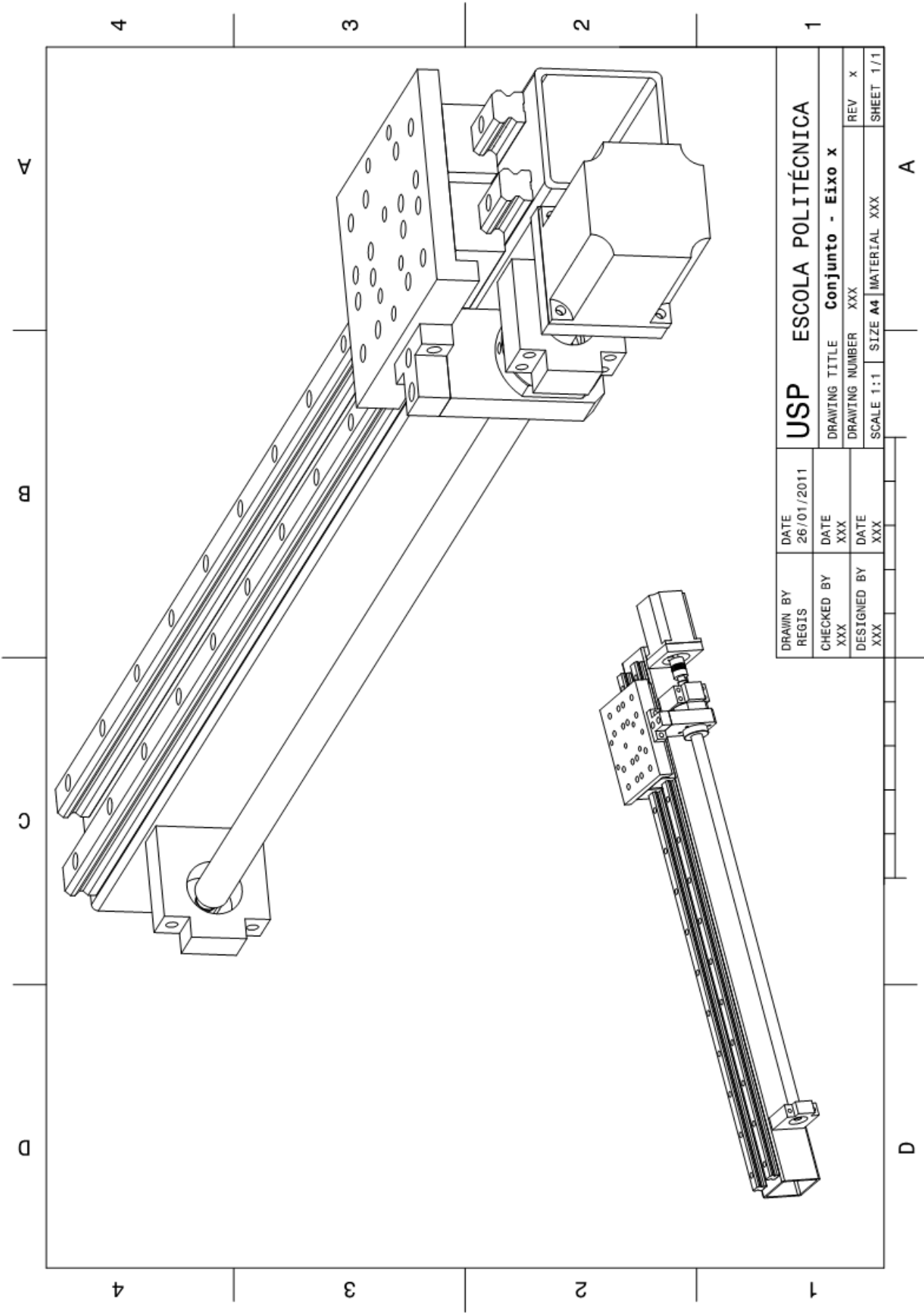
- [SKF 2012]SKF. **Catálogo online de rolamentos de uma carreira de esferas**. 2012. Disponível em: < http://www.skf.com/skf/productcatalogue/jsp/viewers/productTableViewer.jsp?&lang=pt&tableName=1_1_1&presentationType=3&startnum=1>. Acesso em: 21 jan. 2012.
- [Stroustrup 1997]STROUSTRUP, B. **The C++ Programming Language**. Special Edition. New Jersey: Addison-Wesley, 1997. 912 p.
- [Tink Roll 2011]Tink Roll. **Mancais Hiwin: modelos**. 2011. Disponível em: < [http : //www.tinkroll.com.br/modelos – mancais – hiwin.html](http://www.tinkroll.com.br/modelos-mancais-hiwin.html)>. Acesso em: 21 dez. 2011.
- [USIWAL Indústria mecânica 2012]USIWAL Indústria mecânica. **Serviços de usinagem**. 2012. Disponível em: <<http://www.usiwal.ind.br/Site2009/usinagem.php>>. Acesso em: 17 mar. 2012.

APÊNDICE A – Desenhos

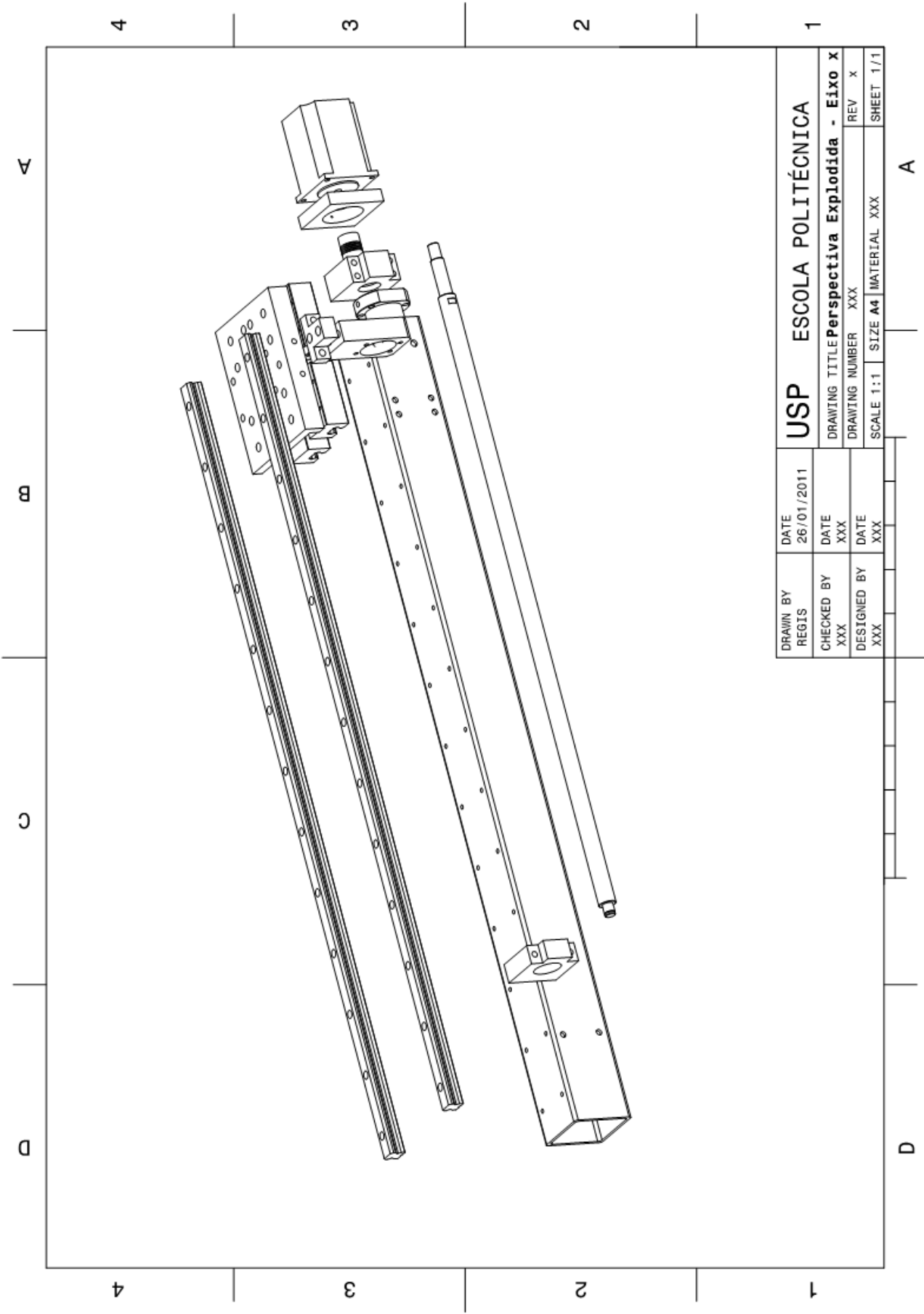
A.1 Desenhos

Nesta seção do documento são apresentados desenhos mecânicos do manipulador desenvolvido.

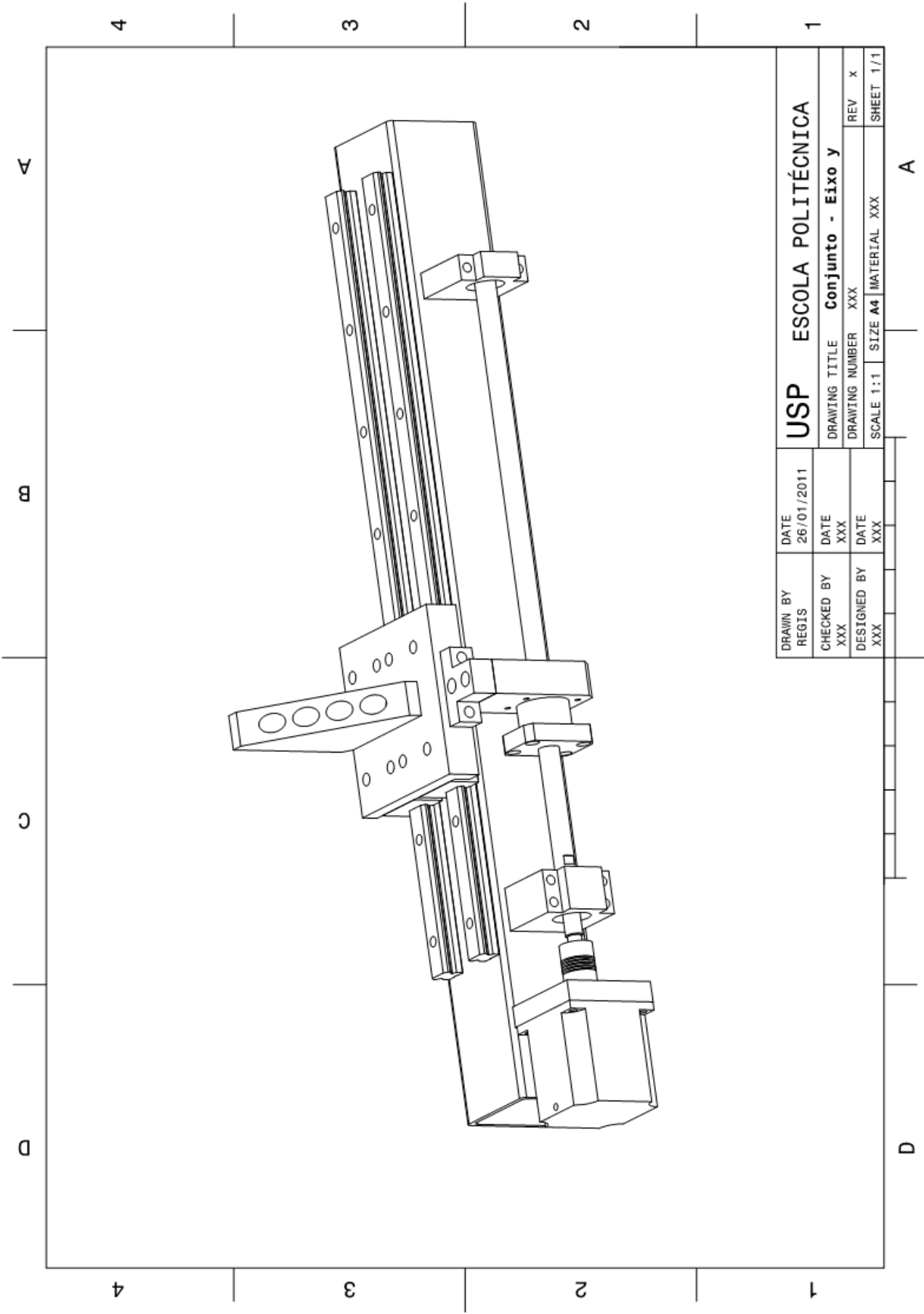




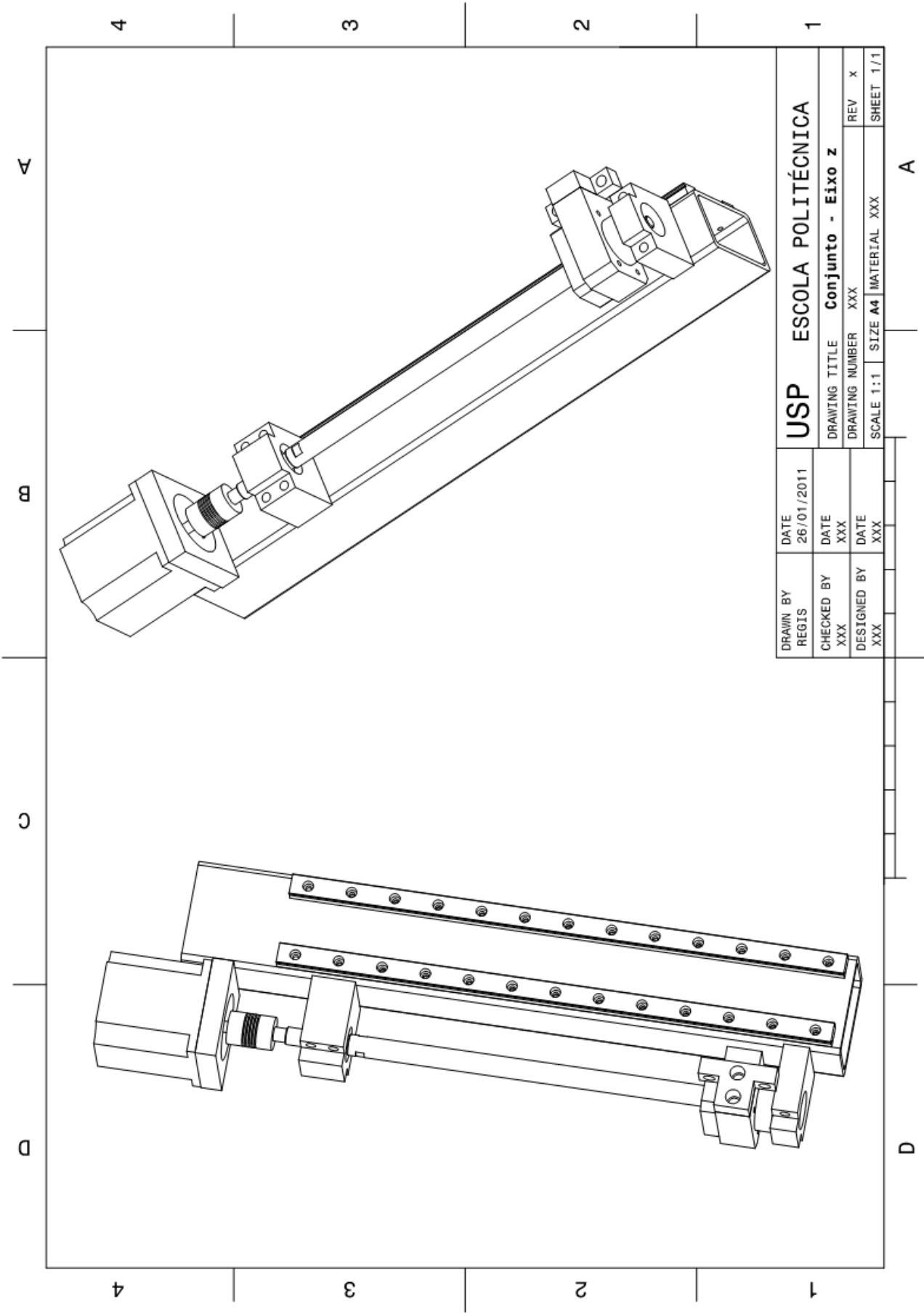
DRAWN BY REGIS	DATE 26/01/2011	USP ESCOLA POLITÉCNICA			
CHECKED BY XXX	DATE XXX	DRAWING TITLE	Conjunto - Eixo x		
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	DRAWING NUMBER	XXX	REV	x
		SCALE	1:1	SIZE	A4
		MATERIAL	XXX	SHEET 1/1	



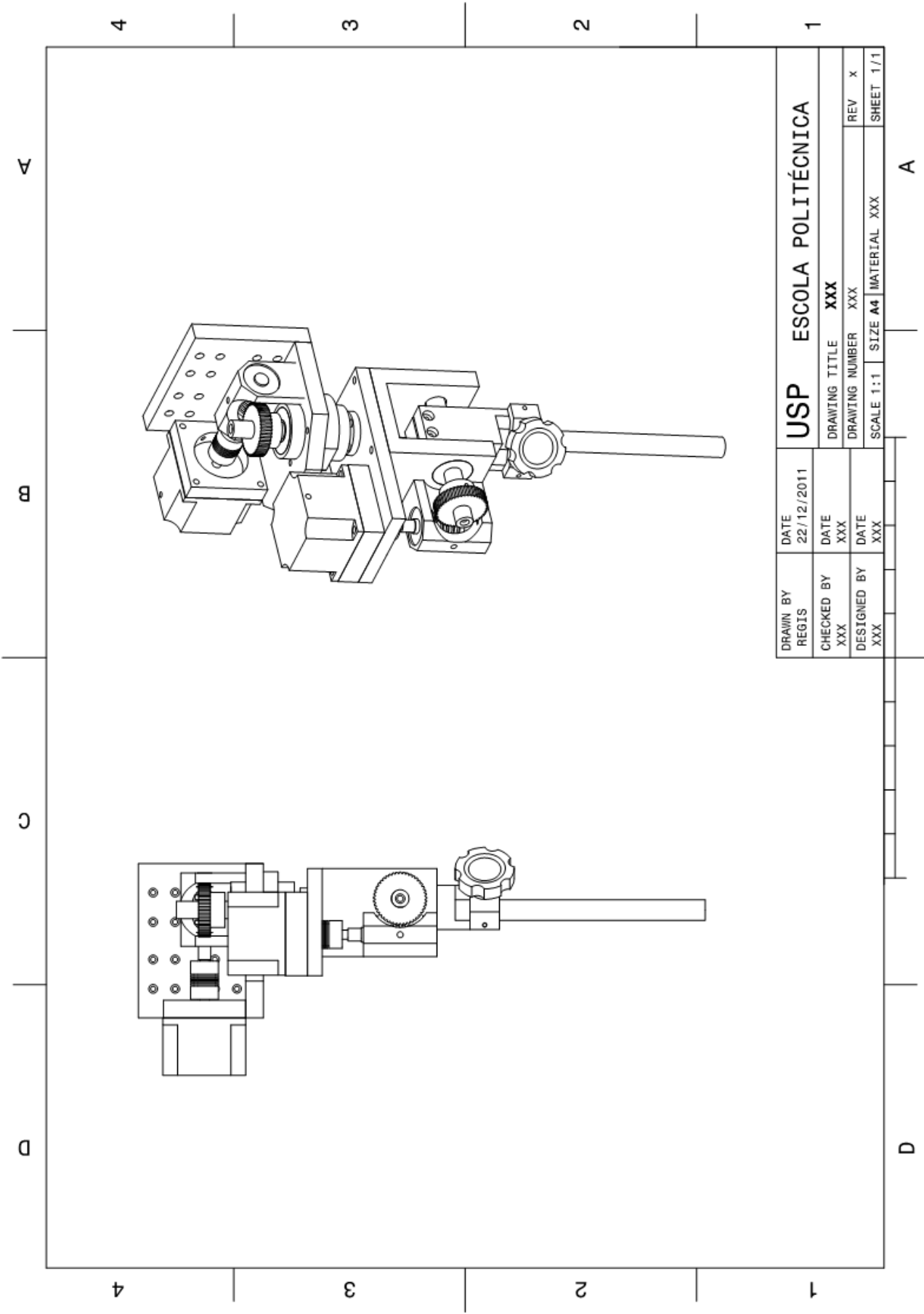
DRAWN BY REGIS	DATE 26/01/2011	USP ESCOLA POLITÉCNICA			
CHECKED BY XXX	DATE XXX	DRAWING TITLE Perspectiva Explodida - Eixo x			
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	DRAWING NUMBER XXX	REV x	SHEET 1/1	
SCALE 1:1		SIZE A4	MATERIAL XXX		



DRAWN BY REGIS	DATE 26/01/2011	USP ESCOLA POLITÉCNICA			
CHECKED BY XXX	DATE XXX	DRAWING TITLE	Conjunto - Eixo y		
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	DRAWING NUMBER	XXX	REV	x
		SCALE	1:1	SIZE	A4
		MATERIAL	XXX	SHEET 1/1	



DRAWN BY REGIS		DATE 26/01/2011	USP ESCOLA POLITÉCNICA			
CHECKED BY XXX		DATE XXX	DRAWING TITLE Conjunto - Eixo z			
DESIGNED BY XXX		DATE XXX	DRAWING NUMBER XXX		REV x	SHEET 1/1
			SCALE 1:1	SIZE A4	MATERIAL XXX	



DRAWN BY REGIS	DATE 22/12/2011	USP ESCOLA POLITÉCNICA			
CHECKED BY XXX	DATE XXX	DRAWING TITLE XXX			
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	DRAWING NUMBER XXX		REV x	SHEET 1/1
		SCALE 1:1	SIZE A4	MATERIAL XXX	