

LEANDRO LARA TIAGO

Projeto de um simulador de atitude com três graus de liberdade

São Paulo

2013

LEANDRO LARA TIAGO

Projeto de um simulador de atitude com três graus de liberdade

Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau

São Paulo

2013

LEANDRO LARA TIAGO

Projeto de um simulador de atitude com três graus de liberdade

Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Engenheiro Mecatrônico.

Área de Concentração: Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau

São Paulo

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Tiago, Leandro Lara

Projeto de um simulador de atitude com três graus de liberdade / L.L. Tiago. -- São Paulo, 2013.

65 p.

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

1.Mecatrônica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

TIAGO, LEANDRO LARA. **Projeto de um simulador de atitude de três graus de liberdade**. São Paulo. 2013. Graduação. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Dedico este trabalho a meu pai Ari Menezes
Tiago, minha mãe Vania Aparecida Watana-
bi Lara e meu tio Luis Carlos Watanabi Lara.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos às instituições Universidade de São Paulo, e Politecnico di Milano.

Aos Orientadores Prof. Dr. Delson Torikai e Prof. Dr. Rodrigo Lima Stoeterau que me acompanharam durante a graduação.

Agradeço ao governo federal pela oportunidade de fazer intercâmbio pelo Ciência sem Fronteiras.

RESUMO

O objetivo do projeto foi o desenvolver a partir da integração de componentes mecânicos e eletrônicos um simulador de atitude para ser empregado em testes e demonstrações nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Muitos veículos terrestres, navais e aeroespaciais autônomos ou não, possuem um sistema inercial de navegação responsável por oferecer uma orientação absoluta. Estes sistemas de navegação inerciais necessitam de equipamentos específicos capazes de simularem os movimentos de atitude dos veículos, tanto para fornecerem parâmetros para o seu desenvolvimento quanto para sua aferição e calibração.

Como abordagem para o desenvolvimento usou como orientação, a metodologia de projeto de proposta por Rosenfeld (2006). Esta metodologia engloba projeto informacional, projeto conceitual, projeto funcional, projeto detalhado. Assim o trabalho proposto englobou também a construção e testes do simulador.

Um simulador tem três graus de liberdade, apresenta um grau consideravelmente de dificuldade em seu projeto, dado os requisitos mecânicos, eletrônicos e de integração de ambos. A ausência de atrito e a capacidade de rotação total em torno de um ponto forma requisitos de primários no projeto mecânico. A melhor alternativa considerada que permitiria atingir tal exigência foi a utilização de um mancal esférico aerostático. Então em sua construção, além do mancal para apoio da mesa de reação, motores com encoders acoplados, um sensor de giros ligado à mesa, além do microcontrolador Arduino. Durante etapa de testes serão colhidos dados de encoder, sensor de giros conforme entradas degrau para cada motor do mecanismo. Assim o resultado deste projeto será a possibilidade de calibração de alguns tipos de IMUs (Inertial Measurement Units).

Palavras-Chave: Simuladores de Atitude. Mancal Aerostático. Unidades de Medida Inercial (IMU). Roda de Reação.

ABSTRACT

The main goal in this Project is to develop an attitude simulator including mechanical and eletronical components to be delivered to the Laboratories of Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, where it can be used to make tests and demos. Many kinds of autonomous and non-autonomous vehicles, the landing, the navy and the aerospace ones have an Inertial Measurement Unit, device that is responsible to estimate an absolut orientation. These navigation systems need specific equipment to simulate the attitude movements in the vehicle for the development and for the calibration, the mentioned equipment is the attitude simulator.

Using Rozenfeld's Project Methodology, this job includes the Informational Project, Conceptual Project, Functional Project, Detailed Project. Additionally, this porposed labor includes the building and tests as well. The Simulators has three degree of freedom, increasing its implementation difficulty. The best considered solution, that would enable this requirement was the spherical aerostatic bearings. Thus for the building, beyond the bearings to sustain the reaction wheel, gearmotors with encoders, a gyros sensor linked to the table, and Arduino Microcontroller as well. So the results of this project will be the possibility of calibrating some different IMUs (Inertial Measurement Unit).

Keywords: Aerostatic Bearings. Attitude simulator. Inertial Measurement Unit. Reaction Wheel.

Lista de Ilustrações

Figura 1: Foto de simulador de atitude destinado a testes em humano (Iron Cross Attitude Simulator (1956), < http://www.space.com/18212-iron-cross-attitude-simulator-with-pilot.html >)	22
Figura 2: Ângulos de Euler (< http://www.quickikiwiki.com/en/Roll-pitch-yaw >)	23
Figura 3: Lógica da Metodologia de Projeto Adaptado de (ROSENFELD. Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo, 2006).....	24
Figura 4: Teorema de Pitágoras para Cálculo do Diâmetro	26
Figura 5: Coeficiente de Descarga do Fluxo Através do Restritor Calculado pelo Efeito Joule-Thomson (Wang, 1993).....	29
Figura 6: Variáveis de Teta1, Teta2, Teta3, Teta4 (Dinesh Rakwal, Eberhard Bamberg).....	30
Figura 7: Acionamento Mancal Esférico	32
Figura 8: Lógica Eletrônica	33
Figura 9: Projeto Funcional: Visão macro	34
Figura 10: Desenho das peças integradas	35
Figura 11: Mancal Detalhado com a Esfera de Efeito Translúcido Neste Enquadramento.....	35
Figura 12: Mancal Acoplado à Mesa de Reação.....	36
Figura 13: Esquema Eletrônico.....	36
Figura 14: Três Hastes Horizontais da Base com três vibra stop	37
Figura 15: Haste Vertical Soldada à Base em Forma Estrela, Juntamente com Interface para o Mancal.....	38
Figura 16: Esfera/Rotor que se Apoia no Estator.....	38
Figura 17: Esfera e seu Centro em Relação ao Estator	39
Figura 18: Vista do Estator do Mancal Aerostático.....	39
Figura 19: furação dos restritores de fluxo do mancal	40
Figura 20: Detalhe do Restritor no Estator do Mancal	40
Figura 21: Lapidação da Esfera com Estator.....	41
Figura 22: Esfera Antes e Depois da Lapidação	42
Figura 23: Estator Antes e Depois da Lapidação.....	42

Figura 24: Manômetro Utilizado para Regular a Pressão de Alimentação do Mancel.....	42
Figura 25: Esfera em Corte com Mesa Acoplada	43
Figura 26: Mesa já com contra-pesos inclusos	43
Figura 27: Figura com Todos os Componentes Projetados em Diversos Ângulos.....	44
Figura 28: Visão explodida com lista de materiais subsequente	45
Figura 29: Estrutura Montada com Eletrônica	47
Figura 30: Arduino Mega 2560.....	48
Figura 31: Diagrama do Circuito Integrado L298 (Datasheet L298, 2000).....	48
Figura 32: Ilustração de conexão interna e externa de um canal (Datasheet L298, 2000)......	50
Figura 33: Placa do Driver Comercial com Conexões do L298	50
Figura 34: Da Esquerda para Direita, Redução, Motor e Encoder Conectados.....	52
Figura 35: Sensor de Giros modelo GY 521	53
Figura 36: Modelo simplificado de um Sensor de Giros (Gyros Sensor - How They Work. Epson.< http://www5.epsondevice.com/en/sensing_device/gyroportal/about.html >).	53
Figura 37: ligação sensor Giros GY 521	54
Figura 38: Módulo de Leitura e Escrita de Cartão SD.....	56
Figura 39: Teste de Driver, Arduino e Motor sem Carga	57
Figura 40: Gráfico de Entrada em Volts no motor Z e Gráfico de Saída em Pontos.....	57
Figura 41: base de referência para a mesa	58
Figura 42: Gráficos da Entrada em Volts, e Saída dos Valores de Velocidade Angular.....	59
Figura 43: Experimento 2	60
Figura 44: Leitura do Sensor GY521.....	66

Sumário

Sumário	15
1.INTRODUÇÃO	17
1.1 Formulação do Problema.....	18
1.2 Relevância.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivos gerais.....	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 Abordagem Metodológica	19
1.4.1 Estudo Teórico	19
1.4.2 Estudo Experimental	20
1.5 Estrutura do Trabalho	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1 Projeto	24
3.2 Planejamento do Projeto.....	24
3.3 Projeto Informacional.....	25
3.4 Projeto Conceitual.....	26
3.5 Projeto Funcional	34
3.6 Projeto Detalhado	37
4. ENSAIO e RESULTADOS	56
Experimento 1 – Motor Z e Coleta de Dados pelo Encoder:.....	56
Experimento 2 – Entrada Degrau no Motor Z Acoplado e Coleta de Dados.	58
5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	61
Experimento 1 – Motor Z e Coleta de Dados pelo Encoder:.....	61
Experimento 2 – Entrada Degrau no Motor Z Acoplado e Coleta de Dados.	61
5.1 Trabalhos Futuros	62

Referências.....	63
Apêndices	65
Apendice 1 – Experimento com Sensor de Giros	65
Anexos – Desenhos de Fabricação.....	67

1.INTRODUÇÃO

Muitos veículos terrestres, navais e aeroespaciais autônomos, possuem um sistema inercial de navegação, responsável por oferecer uma orientação absoluta. Estes sistemas de navegação inerciais necessitam de equipamentos específicos capazes de simularem os movimentos de atitude dos veículos, tanto para o seu desenvolvimento quanto para sua aferição e calibração. Os equipamentos específicos mencionados são Simuladores de Atitude.

Os sistemas de navegação inercial são capazes de medir as acelerações e velocidades angulares de um corpo, consequentemente possibilitam cálculo de mudanças de posição e atitude por meio de sucessivas integrações numéricas (SILVA, 2010).

Nestes, a obtenção de informações sobre a posição e a velocidade de um veículo com relação a um referencial são fornecidas por sensores tais como acelerômetros e girômetros. (SANTANA, 2005).

Simplificadamente, uma Unidade de Medição Inercial (IMU) é um instrumento de medição que possui três girômetros, três eixos ortogonais e cada eixo acoplado um acelerômetros, que permitem determinar as componentes da velocidade angular do corpo onde está presente (LIMA, 2005).

Um ponto extremamente importante para se levar em consideração em um sistema autônomo, é a fase de testes. Quando levamos em consideração o meio de trabalho do protótipo, devemos enfatizar ainda mais esse aspecto. Imaginemos as condições as quais são submetidos sistemas aeroespaciais ou navais por exemplo. Assim, faz-se necessário calibrar e testar tais sistemas exaustivamente.

O tema deste trabalho é o estudo, projeto, construção e testes de um simulador de atitude com foco em sistemas de navegação de emprego naval. Assim é possível calibrar tais Sistemas de Medidas de Inércia, como por exemplo os utilizados nos AUVs em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Mecatrônica (PMR). Uma IMU (Unidade de Medida Inercial) utilizada é o KVH CG-5100, baseado em tecnologia FOG e MEMs acelerômetros (KVH CG-5100 Inertial Measurement Unit (IMU), 2010), e deve ser o principal alvo de calibração.

1.1 Formulação do Problema

Simuladores de atitude são sistemas mecatrônicos de alta complexidade, e normalmente não tem produção em série sendo feitos sob encomenda, o que acarreta em custos elevados. Simuladores disponíveis no mercado internacional, normalmente ocupam grande volume, o que encarece o custo de importação, além do alto valor de compra e das restrições de comercialização.

Comparativamente, simuladores de atitude navais tem diferença em relação a simuladores de atitude aeroespaciais, em princípios são exatamente os mesmos, porém o que particulariza um em relação ao outro são os requisitos, isto é, a condição de calibração deve se fazer coerente com a condição de operação, assim a condição de calibração tende a ser levemente diferente para cada tipo de simulador.

1.2 Relevância

A tecnologia de um simulador de atitude é presente no estado de arte, porém o ponto é que não somos nós brasileiros detentores desta tecnologia. Segundo Manuais Oslo (Finep, 2004) e Frascati (OECD , 2007), é também inovação tecnológica quando alguma entidade (re)inventa uma tecnologia já existente, uma vez que obrigatoriamente houve pesquisa, capacitação e desenvolvimento para atingi-la.

Considerando este aspecto dentro do crescimento tecnológico brasileiro, o programa espacial é ainda uma das prioridades do governo federal, espera-se ainda neste ano enviar lançar o satélite CBERS 3 ao espaço. No período 2012-2021 o governo pretende investir 9,1 bilhões no setor. Assim fica evidente a necessidade de se haver um aparelho como o simulador de atitude de tecnologia nacional. (<http://www.sae.gov.br/site/?p=15309>)

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo do projeto foi o de desenvolver a partir da integração de componentes pneumáticos, mecânicos e eletrônicos um simulador de atitude de 3 graus de liberdade para sistemas de navegação de um Veículo Autônomo Submarino. A intenção é que o simulador tenha condições de ser empregado em testes e demonstrações nos laboratórios da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1.3.2 Objetivos específicos

Como guia de gerenciamento, aplicaremos metodologia de projeto de Rosenfeld (2006), que significa dividi-lo em:

- Projeto Informacional: tradução das necessidades;
- Projeto Conceitual: implicações do Projeto Informacional em requisitos de projeto;
- Projeto Funcional: solução na forma macro;
- Projeto Detalhado: Desenhos, especificação técnica, seleção de componentes, dimensionamentos e código programado.

Assim, sequencialmente faremos a construção do protótipo, testes de movimentos e análise e documentação dos resultados.

1.4 Abordagem Metodológica

1.4.1 Estudo Teórico

Inicialmente, foi feita a revisão bibliográfica, ou seja um estudo de projetos e de simuladores existentes, sendo eles nacionais e internacionais.

Dentre as necessidades e dificuldades impostas ao sistema, é feita uma análise de possibilidades de solução. Uma vez levantadas as alternativas de solução, utilizamos matriz de decisão, para julgar qual teria a melhor aplicabilidade dentro deste projeto.

Dentre as características deste projeto salientamos que será feito com um grau de liberdade, uso de mancal aerostático, técnicas de balanceamento, velocidade de operação baixa do simulador.

1.4.2 Estudo Experimental

Depois de haver planejado como seria a mesa de reação, é iniciada a etapa de construção, isto é, sondagem a fornecedores, compra de material e usinagem de peças.

A segunda etapa da construção é quando integramos as diferentes unidades do sistema, isto quer dizer o mancal pneumático, eletrônica de operação, e acionamentos.

Assim, depois da integração final, são feitas em seguida medições e testes para avaliar sua resposta.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 6 capítulos, no capítulo 1 temos a introdução, a argumentação da relevância do problema, os objetivos gerais e específicos, e a descrição e como são feitos estudos teóricos e experimentais.

O capítulo 2 disserta sobre referências da literatura, assim foram levantados trabalhos no âmbito nacional e internacional que tratam do assunto, aqueles que mais se assemelhavam sob o ponto de vista de projeto mecânico e de controle com o presente trabalho, têm mais enfoque neste trecho.

O capítulo 3 é dedicado ao projeto, considerando metodologia sequencial de projeto Informacional, Projeto conceitual, Projeto Funcional, Projeto Detalhado (Rosenfeld, 2006), o Projeto é aprofundamento por camadas, desde a simples percepção de necessidades à especificação, seleção de material e programação do microcontrolador.

No capítulo 4, são feitas as descrições dos experimentos desejados para este trabalho na fase de testes, e também são descritos os resultados obtidos, começando com testes mais simples com apenas um motor ativo e a leitura de seu encoder até os três motores ativos e a leitura do sensor de giros.

No capítulo 5, ocorre a discussão dos resultados obtidos no capítulo 4, isto é, argumentação técnica de possíveis justificativas para o retorno obtido.

O capítulo 6 trata da análise conclusiva da teses e seus objetivos, assim como propõe sugestões para trabalhos futuros nesta literatura.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Simuladores de atitude são plataformas destinadas a simular orientações e variações de orientação de um corpo. O principal tipo de simuladores aqui estudados são os utilizados para calibração de Unidades de Medida Inercial.

Há registros de simuladores de atitude com maior ênfase desde o início da era espacial, o simulador de atitude da Fig.1, ilustra um simulador destinado a fazer testes de orientações de uma plataforma para preparação e observação do piloto na NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) que mais tarde se tornou a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

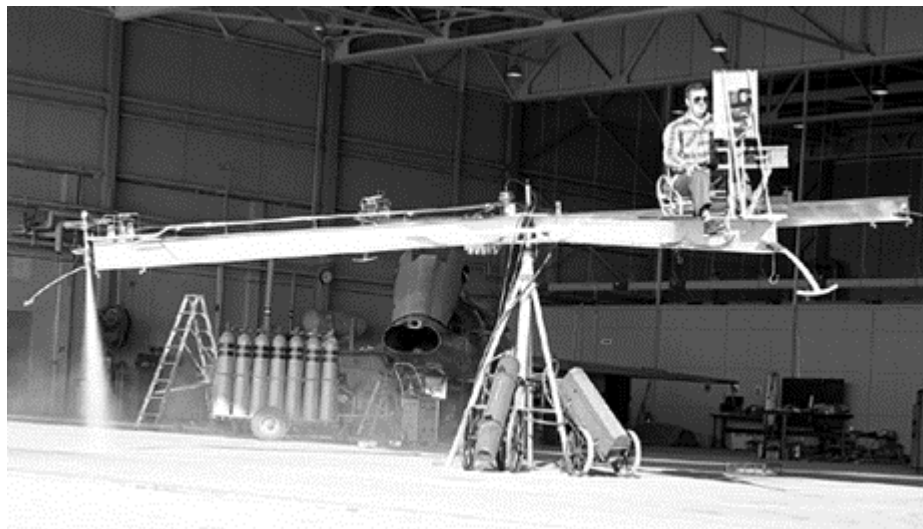


Figura 1: Foto de simulador de atitude destinado a testes em humano (Iron Cross Attitude Simulator (1956),
<<http://www.space.com/18212-iron-cross-attitude-simulator-with-pilot.html>>)

Simuladores de Atitude de três graus de liberdade têm a capacidade de executar os movimentos com relação ao ângulo de Euler: Pitch, Yaw e Roll, como ilustra Fig. 2.

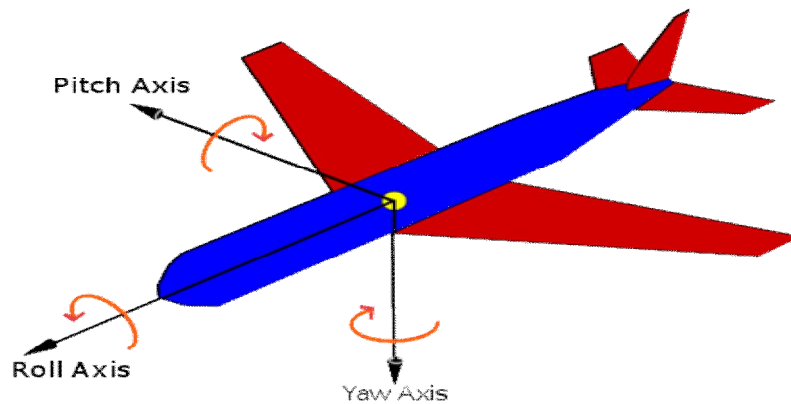


Figura 2: Ângulos de Euler (<<http://www.quickiwiki.com/en/Roll-pitch-yaw>>)

Diversos sistemas de navegação como aviões, navios, satélites, mísseis, assim como smartphones têm unidades de medida inerciais (IMU) internamente que permitem a obtenção de posicionamento e orientação.

Considerando este tema, um dos primeiros trabalhos significativos publicados no Brasil é o de Fleury (INPE, 1987). Este trabalho foi o projeto e fabricação de um simulador de atitude de um grau de liberdade (eixo Z). Este trabalho continha mancal esférico e motor com faixa de 50 a 2000 rpm, e utilizava controlador PI, e tem como sensor principal um codificador ótico-incremental.

Uma tese mais atual é a de Luis Silva (UEL, 2008), que foca no desenvolvimento de software para determinação de atitude baseado em sensores microfabricados. Em uma mesa de reação já existente, é projetado um protótipo capaz de determinar a sua atitude. Ele aplica Filtro de Kalman para processamento de medidas de entrada vindos dos sensores MEMS.

O trabalho de Huang (2009) é focado na eletrônica e no controle de uma plataforma de três eixos seriais. Utiliza PLC e controle PID.

Um trabalho bem expressivo e detalhado encontrado é a tese de mestrado de Janaina Souza (2007). Esta tese já discorre o projeto e a fabricação de um mancal esférico aerostático de três graus de liberdade. Cada grau de liberdade corresponde a um eixo posicionado ortogonalmente aos outros, porém a particularidade deste trabalho são os motores e rodas de reação que foram posicionadas internamente a esfera do mancal. Vale destacar que a mesa possui também dispositivos de balanceamento estático e utiliza giroscópios mecânicos como sensores da mesa.

Outras publicações encontradas comumente usam giroscópio como sensor principal, e rodas de reação acopladas à mesa, motores elétricos e mancal esférico aerostático. Aspectos que apresentaram maior variedade de aplicações foram o processamento dos dados e a forma de controle.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Projeto

Visto que é importante a aferição de sistemas de navegação, este trabalho consistirá em construir uma plataforma com objetivo de calibrar a unidade de medida inercial (IMU) KVH. Para tal serão utilizados motores para movimento, técnicas de balanceamento estático e dinâmico, mancal aerostático, e sensores para medidas e aquisição de dados durante o teste.

O projeto seguirá o processo de desenvolvimento de Produto seguindo as etapas essenciais: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Funcional, Projeto Detalhado, como a Fig. 3:



Figura 3: Lógica da Metodologia de Projeto Adaptado de (ROSENFELD. Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo, 2006)

3.2 Planejamento do Projeto

Nesta fase o projeto é formalmente iniciado e como resultado obtivemos um plano de projeto do sistema de atitude. Assim, o projeto tem como escopo criar um simulador de atitude de baixo custo, a duração do trabalho é dois semestres letivos. Este período incluirá projeto, construção, testes e análise de resultados.

Como já dito anteriormente, um simulador de atitude pode calibrar diferentes Unidades de Medida de Inércia, a princípio este trabalho tenderá a haver necessidades mais particulares, nosso objetivo principal é fazê-lo apto a calibrar futuramente a (IMU) KVH. Vale ressaltar que os resultados retirados deste experimento também terão grande valor para calibração de outras Unidades de Medida de Inércia futuramente.

3.3 Projeto Informacional

Nesta fase do projeto, enunciamos alguns requisitos de projeto superficialmente, sem detalhar especificações ou tirar conclusões sobre valores.

Neste período, através da análise de outros sistemas existentes. Identificamos como necessidade de operação, que o protótipo seja de fácil manutenção, é também importante que seja de fácil interface ao usuário, precisão e alta confiabilidade para ter condições de fazermos a análise significativa de resultados.

Com respeito às necessidades relativas aos materiais, salientamos que sejam utilizados materiais de fácil acesso no mercado nacional, isto é, componentes e peças comerciais e fabricável dentro dos limites de uma oficina não necessariamente de alta precisão.

Como necessidades físicas, é desejável que seja de baixo peso, montagem fácil e dimensões compatíveis para que um usuário simples possa operá-la, mas é importantes seja apoiado e fixo diretamente ao chão, ao invés de outros apoios ou mesas afim de evitar vibrações ou instabilidades indesejadas. Quando consideramos o mancral sobre o qual a mesa será apoiada, é de grande importância que haja pouco atrito.

De requisitos eletrônicos, é de grande importância que seus componentes sejam de fácil acesso dentro do mercado nacional assim como os mecânicos, e ainda de fácil substituição ou reparo em caso de acidentes ao equipamento. Outra necessidade já enunciada é haver 3 graus de liberdade, assim idealizamos utilizar 3 motores.

O maior objetivo é fazer um sistema capaz de calibrar o sistema inercial KVH. Assim devemos atender a algumas especificações durante a condição de operação. Temos como dados do KVH (KVH CG-5100 Inertial Measurement Unit (IMU), 2010):

- O peso do KVH é 2,27 kg
- Tomando as medidas de suas extremidades, o KVH pode ser considerado como formato de paralelepípedo, e as dimensões do KVH são 169,3mm x 152,4mm x 88,9mm.

3.4 Projeto Conceitual

Uma vez colhidas as informações de características e valores do manual do KVH, neste momento do projeto, trabalhamos as informações e são definidos requisitos numéricos, a fim de obter valores de projeto.

3.4.1 Mesa: Variáveis

- Considerando as medidas citadas da base do paralelepípedo, podemos calcular a hipotenusa do ângulo formado, que significa o diâmetro mínimo da mesa ilustrado na Fig. 4.

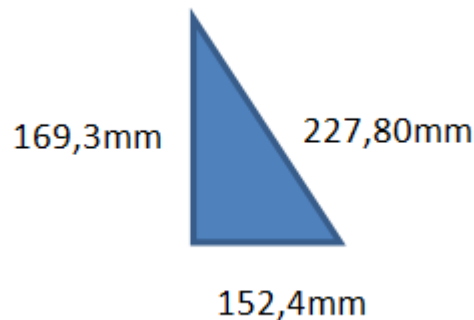


Figura 4: Teorema de Pitágoras para Cálculo do Diâmetro

Através desta hipotenusa, e centralizando o KVH ao centro da mesa, já encontramos o valor de 227,80mm como valor mínimo de diâmetro. Considerando questões de estabilidade, considerando 61,1mm de cada lado, o diâmetro final de projeto da mesa será de 350mm.

3.4.2 Mancal: Conceitos

Mancais podem ser definidos como sendo todos os elementos onde o movimento de translação em qualquer direção deve ser minimizado, se não proibido, deixando livre a rotação somente em torno de um eixo.

Simplificando, os mancais podem ser definidos como os elementos de máquina onde o componente fixo permite ao eixo ter somente um grau de liberdade, sendo que o movimento relativo entre as partes é de rotação. Tal definição, contudo, torna-se muito limitada quando a comparamos com o amplo espectro de utilização dos mancais.

Outra forma de definir mancais, trata esses como sendo o elemento de máquina que normalmente permite somente um grau de liberdade. Estes elementos de máquinas permitem apenas movimentos de rotação, os quais envolvem a transmissão ou absorção de forças radiais e/ou axiais.

Mancais Lubrificados a Filme Fluido

Mancais com lubrificação com filme fluido são aqueles onde a separação entre as partes com movimento relativo é realizada por um filme fluido. Para aplicações usuais ou industriais, mancais com lubrificação a filme fluido são mais utilizados devido à sua longa vida e alta capacidade de carga. Dividem-se em dois tipos principais :

- os mancais fluidodinâmicos, que são aqueles cuja pressão da película de lubrificante que suportará a carga é dependente da velocidade tangencial do mancal;
- os mancais fluidoestáticos, que são aqueles em que as superfícies com movimento relativo são separadas por um filme lubrificante, forçado entre elas sob pressão, a qual é fornecida por uma bomba, ou compressor externo (Stoeterau, 1992).

Quanto ao tipo de fluido, estes podem ser divididos em:

- **Líquidos** - A utilização de líquidos como fluido lubrificante em mancais acarreta a perda das propriedades devido ao calor gerado quando em operação, formando um limitador de velocidade, o que torna necessária a utilização de sistemas de resfriamento para manter o fluido em uma temperatura pré-estabelecida. Dos vários fluidos já testados, o óleo tem se sobressaído, daí vindo a denominação mancal à óleo. Apesar da água apresentar melhores características, sua capacidade corrosiva a tornava pouco atrativa para uso industrial. Entretanto, o desenvolvimento de materiais cerâmicos para a construção de mancais tem permitido uma reavaliação do emprego de água como fluido em mancais hidrodinâmicos e hidrostáticos (Stoeterau, 1992) (Slocun, 2003).
- **Gases** - A utilização de gases como fluido lubrificante se deve a capacidade destes de manter suas propriedades mesmo a temperaturas elevadas, por apresentarem viscosidades muito menores do que as dos líquidos, o que abriu a possibilidade de se atingir velocidades mais elevadas. O uso de gases, principalmente ar, dispensa o uso de sistemas de coleta, retorno e resfriamento necessários aos mancais a líquido. Dos vários tipos de gases já testados, o ar tem sido o gás mais extensivamente utilizado. Portanto, as terminologias mancal a ar, e mancal aerostático tornam-se mais adequadas para designar este tipo de mancal.

Mancais Fluidoestáticos

Mancais fluidoestáticos, mais comumente denominados de mancais hidrostáticos a pressão de sustentação é fornecida por uma bomba. Indubitavelmente um efeito hidrodinâmico existe, e o mancal pode ser melhor descrito como um mancal híbrido (Stoeterau, 1992).

3.4.3 Dimensionamento do Mancal

- Considerando peso da própria mesa (já dimensionada), a esfera, dos motores, bateria, e os outros componentes acoplados, estimamos 9 kg no total de partes móveis. Visto que este é componente chave do funcionamento do simulador adotaremos fator de segurança 5, desta forma o mancal será projetado para suportar peso superior a 30 kg .

Inicialmente escolhemos de acordo com a razão de pressão P_d/P_s (pressão de admissão por pressão de suprimento), Assumindo valor de queda de pressão para 0,83 a 6 bar, encontramos valor de $C_d=0,8$ através da Fig. 5 (Wang, Janming. Design of Gas Bearing Systems for Precision Applications.1993)

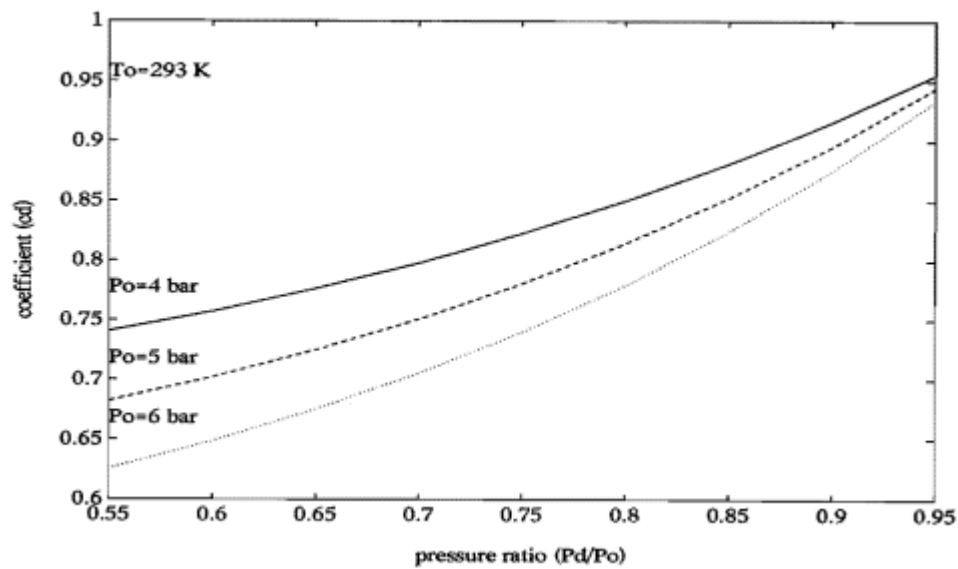


Figura 5: Coeficiente de Descarga do Fluxo Através do Restritor Calculado pelo Efeito Joule-Thomson (Wang, 1993)

A Fig. 6 mostra as variáveis de ângulos adotadas para projeto do mancal.

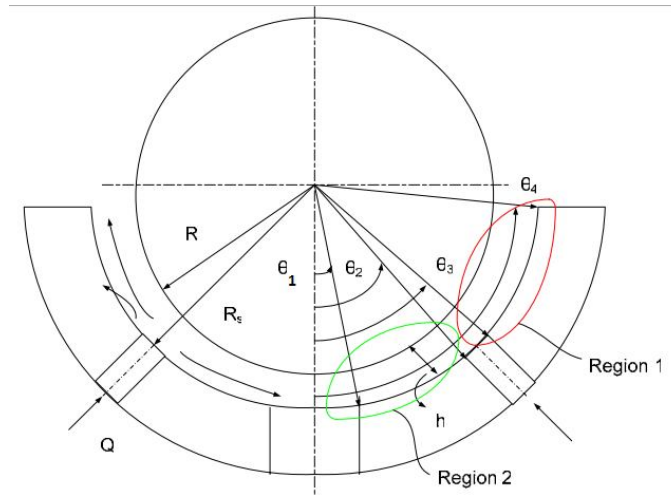


Figura 6: Variáveis de Teta1, Teta2, Teta3, Teta4 (Dinesh Rakwal, Eberhard Bamberg)

Os tetas do sistema projetado estão na tabela 1.

E o Sistema de equações (Rakwal, Bamberg):

$$W = W_{up} + W_{down} \quad \text{Eq. 1}$$

$$W_{up} = \int_{\theta_3}^{\theta_4} \left\{ p_d^2 - (p_d^2 - p_a^2) \frac{\left[\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) - \ln \left(\tan \left(\frac{\theta_3}{2} \right) \right) \right]}{\left[\ln \left(\tan \left(\frac{\theta_4}{2} \right) \right) - \ln \left(\tan \left(\frac{\theta_3}{2} \right) \right) \right]} \right\}^{1/2} 2\pi R_B^2 \sin \theta \cos \theta d\theta \quad \text{Eq. 2}$$

$$W_{down} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left\{ p_d^2 + (p_d^2 - p_a^2) \frac{\left[\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) - \ln \left(\tan \left(\frac{\theta_2}{2} \right) \right) \right]}{\left[\ln \left(\tan \left(\frac{\theta_2}{2} \right) \right) - \ln \left(\tan \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right) \right]} \right\}^{1/2} 2\pi R_B^2 \sin \theta \cos \theta d\theta \quad \text{Eq. 3}$$

Mas também é necessário calcular B, e consequentemente \$p_d\$ (pressão de saída) com as equações (Dinesh Rakwal):

$$p_d = \sqrt{p_a^2 + p_s B \left[\left(\frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad \text{Eq. 4}$$

$$e B = \frac{12 C_d A \mu \sqrt{2 R T}}{\pi h^3} \frac{\ln \left(\frac{\tan \frac{\theta_2}{2}}{\tan \frac{\theta_1}{2}} \right) \ln \left(\frac{\tan \frac{\theta_4}{2}}{\tan \frac{\theta_3}{2}} \right)}{\ln \left(\frac{\tan \frac{\theta_2}{2}}{\tan \frac{\theta_1}{2}} \right) + \ln \left(\frac{\tan \frac{\theta_4}{2}}{\tan \frac{\theta_3}{2}} \right)} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad A = \pi d_o h \quad \text{Eq. 5}$$

Obtivemos $p_d = 5,05$ bar

E carga total calculada $W = 840,91\text{N}$, considerando $p_d = 5,05$ e $C_d = 0,8$

A tabela 1 mostra a relação de parâmetros de projeto utilizados

Tabela 1: Parâmetros de Projeto

Variável	Descrição	Unidades
γ	Calor específico do ar	1,401 cal/g/°C
h	Espessura do filme	25 μm
R	Constante dos gases	8.3144621 J/mol/K
ε	Razão de ecentricidade	0
p_d	Pressão de saída no restritor	4.7 Bar
p_s	Pressão de entrada (alimentação)	6 Bar
p_a	Pressão atmosférica	1 Bar
R_b	Raio da esfera	40 mm
e	Afastamento da esfera	25 μm
T	Temperatura ambiente	20°C
μ	Viscosidade do ar	(20°C) 0.15521 *10-5 Kg/m*s (100°C) 0.6925*10-5 Kg/m*s

C	Folga do mancal	25 μm
Do	Diâmetro do Orifício	0.3mm
Cd	Coeficiente de descarga	0.8
Teta1	Arco inferior da base do mancal	25°
Teta2	Arco do início da furação	64.9975°
Teta3	Arco do fim da furação	65,0025°
Teta4	Arco superior da base do mancal	85°

Com as informações e valores concluídos, podemos buscar a criação de soluções. Decidimos desmembrar a arquitetura da seguinte forma: Eletrônica e Mecânica.

3.4.4 Mecânica

A estrutura mecânica exigirá maior reflexão neste trabalho, sabe-se neste ponto que teremos uma mesa que estará apoiada sobre um suporte vertical de apoio até o solo. O dimensionamento da mesa de incluir espaços para posicionar os componentes eletrônicos de modo a atingir balanceamento estático dela. A conexão entre mesa e suporte vertical deverá ser um mancal esférico, já que há a necessidade de uso de mancal de baixo atrito. Foi decidido aplicar mancal aerostático, assim a área pneumática compreende o uso de tal mancal. Outros fatores que colaboraram com esta escolha foram a limpeza proporcionada, pouco desgaste mecânico e ausência de lubrificação. A Fig. 7 apresenta o diagrama de blocos lógico para o acionamento do mancal:



Figura 7: Acionamento Mancal Esférico

O mancal aerostático funciona através de uma fina camada de gás a alta pressão, e também a sua capacidade de carga suportada depende da área total que restringe a camada de ar. Parece razoável imaginarmos que basta aumentar a pressão desta camada de ar para maximizar sua capacidade de carga, mas vale lembrar que componentes comerciais pneumáticos têm a faixa de opera-

ção até 6 bar, outras faixas de valores existem, por outro lado, o custo aumenta consideravelmente.

3.4.5 Eletrônica

O projeto eletrônico terá um microcontrolador, como *master*, este por sua vez envia e recebe sinais lógicos, de modo que aciona o driver de potência (driver de motor), e este envia a corrente necessária de operação aos motores, em contrapartida, os motores terão sensores de giro (encoders), que enviam pulsos elétricos como retroalimentação ao microcontrolador.

Assim, o setor eletrônico compreende as seguintes estruturas macro na Fig.8, cada um dos blocos será detalhado no projeto funcional e detalhado:

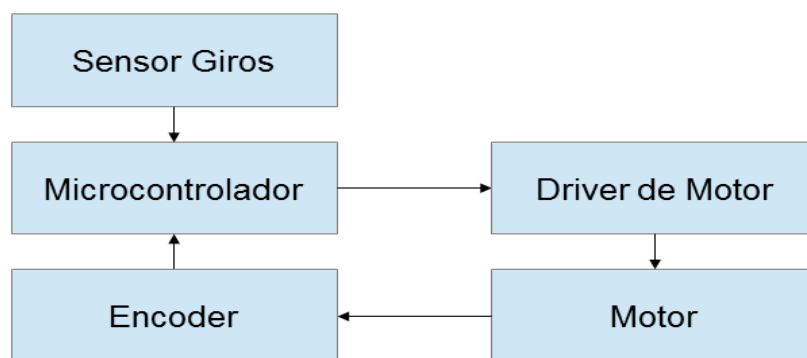


Figura 8: Lógica Eletrônica

3.5 Projeto Funcional

Neste ponto do trabalho, destacamos a representação macro na Fig. 9 e a seleção de soluções.

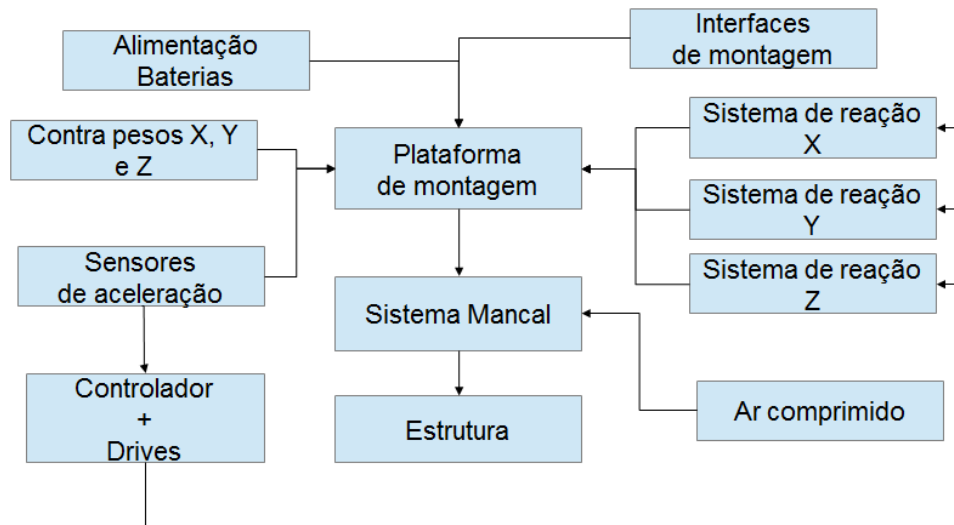


Figura 9: Projeto Funcional: Visão macro

3.5.1 Mecânica

Deste modo como suporte mecânico, foi desenvolvida uma estrutura com três apoios no chão os quais determinam um plano de trabalho e facilitam nivelamento da estrutura, um tubo vertical, e um mancal aerostático que permite que uma mesa tenha três graus de liberdade de acordo com a Fig. 10.

- Estrutura: perfis de aço
- Mancal: aerostático
- Drivers: Ponte H
- Motor: corrente contínua



Figura 10: Desenho das peças integradas

Uma das partes de maior dificuldade de projeto foi o mancal, pois o perfeito funcionamento da plataforma esta vinculado a esta parte. Especificamente para o sistema pneumático teremos o mancal aerostático esférico ilustrado na Fig. 11:

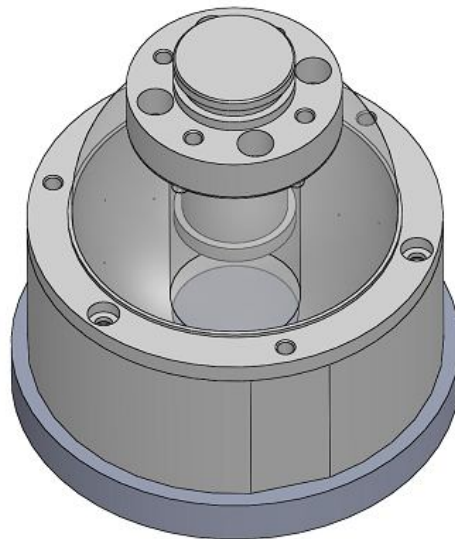


Figura 11: Mancal Detalhado com a Esfera de Efeito Translúcido Neste Enquadramento.

Visualizado o Mancal, podemos acoplar o eixo na esfera, e a mesa no eixo, desta forma para o conjunto temos a Fig.12:

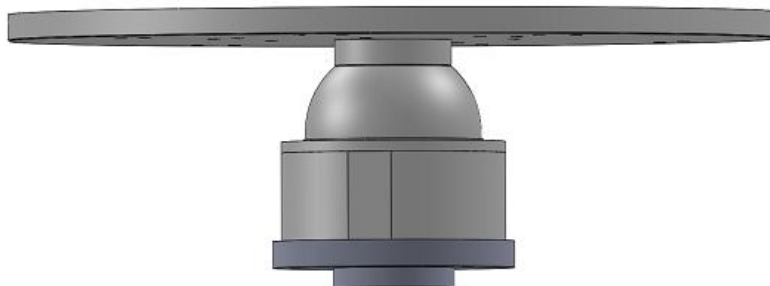


Figura 12: Mancal Acoplado à Mesa de Reação

3.5.2 Eletrônica

Para o sistema elétrico, teremos a representação da Fig. 13 com numeração de portas e todas conexões com microcontrolador e componentes periféricos:

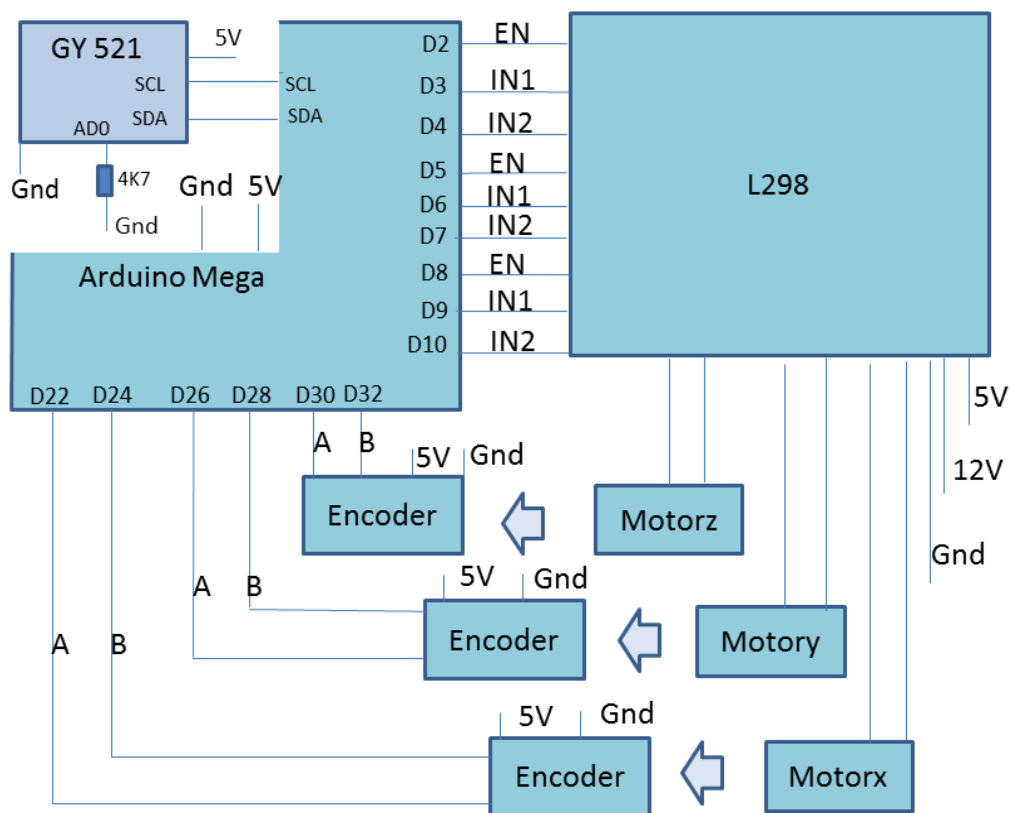


Figura 13: Esquema Eletrônico

3.6 Projeto Detalhado

Neste ponto do projeto, uma vez escolhidas as soluções funcionais, é feito menção a escolha de materiais, decisões de componentes comerciais, especificação de montagem e conexões.

3.6.1 Mecânica

Considerando que são necessários três pontos para apoio, optou-se por construir uma base em forma de três hastes a 120° , para que em cada extremidade fosse instalado um vibra stop, de modo que fosse possível regular com precisão possíveis desnivelamentos conforme Fig. 14. Também foi feita escolha de tubo de aço ABNT 1020 50mmx50mm, por ser de alta resistência e facilidade de encontrar este material no mercado.



Figura 14: Três Hastes Horizontais da Base com três vibra stop

Foi utilizado tubos de 50mmx50mm em Aço ABNT 1020, como ilustra a esquerda da Fig. 15, sobre a qual será apoiada haste que sustenta o mancal esférico, a direita está a estrutura soldada com o mancal incluso na estrutura.



Figura 15: Haste Vertical Soldada à Base em Forma Estrela, Juntamente com Interface para o Mancal

Portanto foram feitas medidas do torno disponível na oficina do departamento da Engenharia Mecatrônica – Automação e Sistemas Mecânicos (PMR), de modo a se conhecer as dimensões máximas de esfera compatíveis com a máquinas CNC. O projeto do mancal foi baseado no livro de Slocum (Precision Machine Design, 1992). A figura 16 apresenta uma visão da esfera do mancal projetada e também a fabricada:



Figura 16: Esfera/Rotor que se Apoia no Estator

A sustentação da esfera se dá pelo estator que tem o mesmo diâmetro, e são coincidentes os centros da esfera e da superfície interna esférica do estator. A fim de aumentar a liberdade de movimentação da esfera, a superfície interna do estator foi projetada de modo que fosse menor verticalmente que o centro da esfera como demonstrado na Fig. 17.

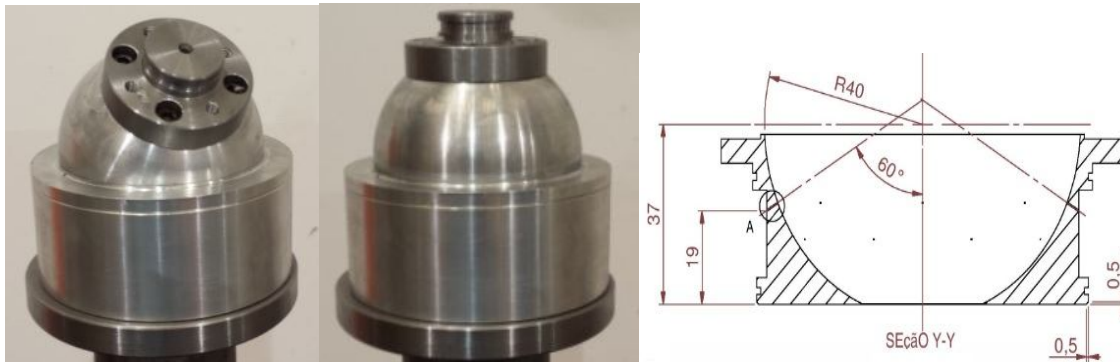


Figura 17: Esfera e seu Centro em Relação ao Estator

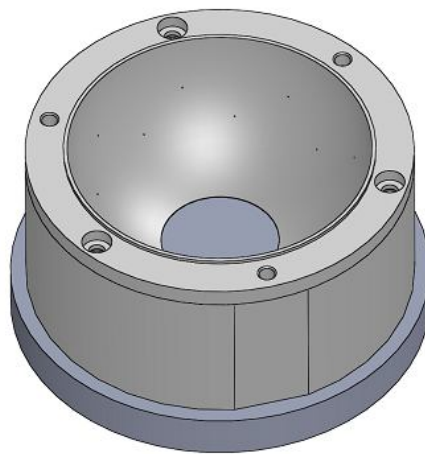


Figura 18: Vista do Estator do Mancal Aerostático

O mancal ilustrado na Fig. 18 exteriormente e na Fig. 17 em corte, enfatiza os furos dos restritores de fluxo pelos quais terão fluxo de ar, vale ressaltar que houve cuidado no projeto da fabricação pois, para melhor performance do jato de ar, os furos devem formar 90° com a superfí-

cie de saída. Os furos foram feitos utilizando fresadora ferramenteira, a peça fica fixa no centro de trabalho, e a fresadora é a responsável pela inclinação adequada, o processo é feito em duas etapas, inicialmente utilizando uma broca de centro de 1mm x 3.1mm se marca os pontos desejados, mas sem a perfuração completa, apenas uma marca superficial que servirá como referência para o furo passante de 0.3mm de acordo com a Fig. 19 e Fig. 20.



Figura 19: furação dos restritores de fluxo do mancal

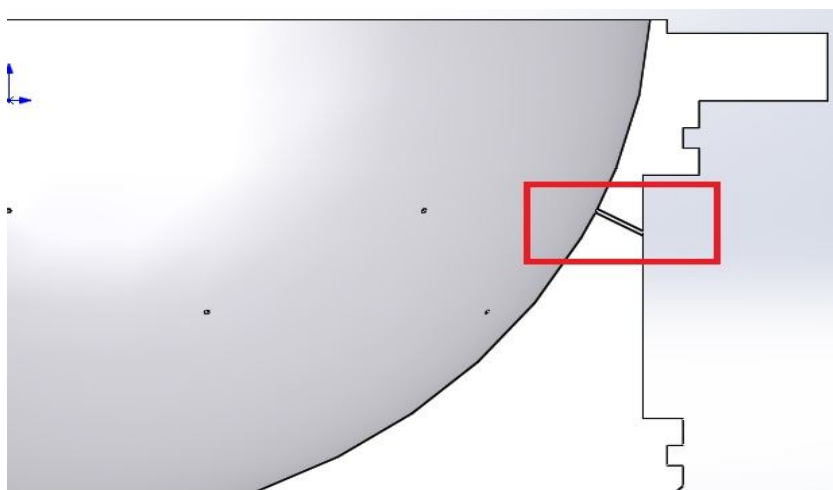


Figura 20: Detalhe do Restritor no Estator do Mancal

De acordo com a disponibilidade de equipamentos da oficina do Departamento PMR, existem dois principais modos de fabricação fresa e torno CNC. A usinagem da esfera foi feita em um torno CNC, este processo de usinagem se mostra mais vantajoso com relação ao acabamento superficial e tolerância geométrica da peça esférica em relação à possibilidade de fazê-lo em fresa. Mais detalhadamente sobre a fabricação, a partir de um cilindro, é feita meia esfera no torno, depois se inverte a posição do material, e completa-se a outra metade da esfera.

Esta fabricação trouxe um pequeno desnivelamento entre cada meia esfera, sendo também verdade que a esfera e o estator acabam por terem tolerâncias levemente diferentes por serem processos de usinagens separados. Assim foi necessário um processo de lapidação, fixou-se a esfera em um torno manual, de posse de uma lixa, e em um segundo momento com auxílio de um pó a base de Carboneto de Silício juntamente com fluido de corte, manuseia-se o estator contra a esfera como demonstrado na Fig. 21 manualmente com movimentos aleatórios. O processo é feito em duas etapas idênticas, a primeira é onde ocorre mais desbaste da peça, e a segunda é para ajuste fino, o processo da lapidação é responsável por ajustar a geometria e a folga.



Figura 21: Lapidação da Esfera com Estator

Mostra-se o resultado obtido com a lapidação, a Fig. 22 é ilustra a esfera antes e depois, assim como na Fig. 23 é ilustrado o Estator antes e depois.



Figura 22: Esfera Antes e Depois da Lapidação



Figura 23: Estator Antes e Depois da Lapidação

Para abastecer o mancal aerostático, foi utilizada a pressão da rede do prédio da Engenharia Mecânica da Escola Politécnica que tem gás a 7 bar, com intuito de regular a pressão do sistema foi utilizado um manômetro como o da Fig. 24



Figura 24: Manômetro Utilizado para Regular a Pressão de Alimentação do Mancal

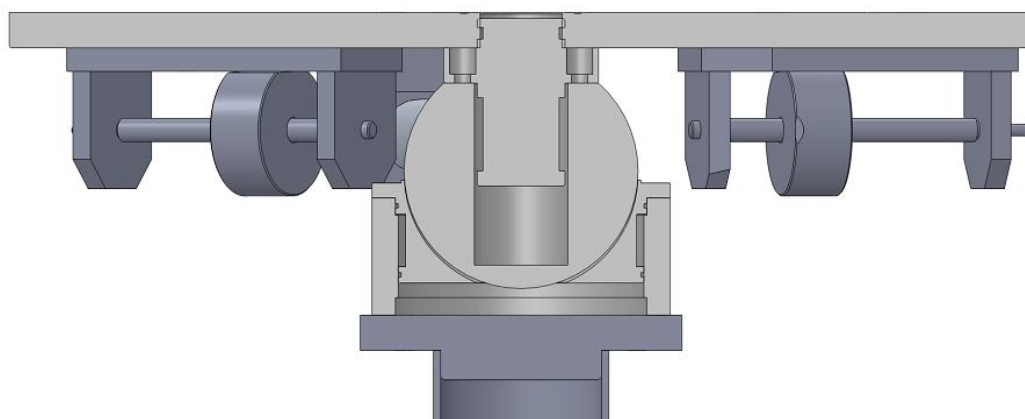


Figura 25: Esfera em Corte com Mesa Acoplada

Por fim, a Fig. 25 mostra o mancal com a esfera quando acoplado à haste vertical, mostra-se também a montagem do conjunto mesa, eixo de acoplamento, estator e rotor do mancal aerostático em corte. A Figura 26 mostra uma visão da completa com motores e massas inerciais, contra-pesos e mancal. Para que realizarmos o balanceamento estático da estrutura, foram incluídos contra-pesos, de modo que houvesse uma carga móvel em um fuso linear. Desta forma, há uma forma simples para o balanceamento estático, basta fazermos a translação desta carga manualmente antes de operar a máquina.

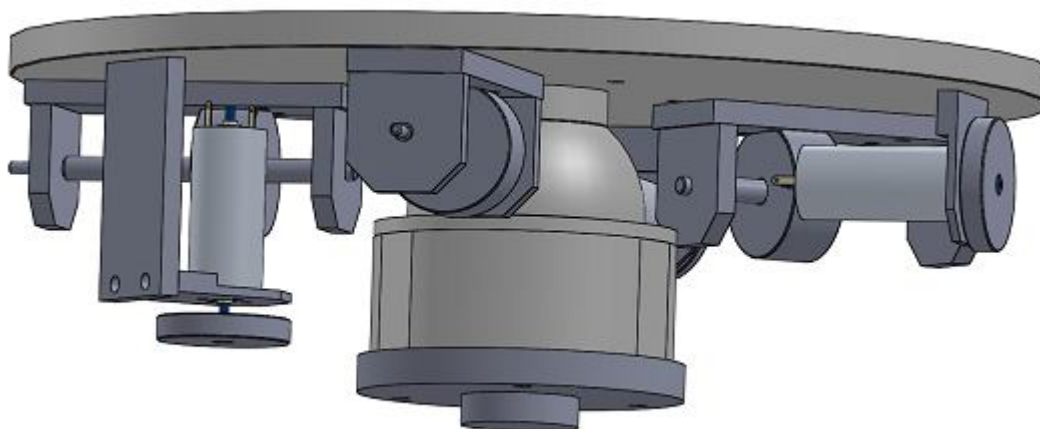


Figura 26: Mesa já com contra-pesos inclusos

A Fig. 27 mostra a vista da mesa completa sob diferentes perspectivas, sem eletrônica de controle.

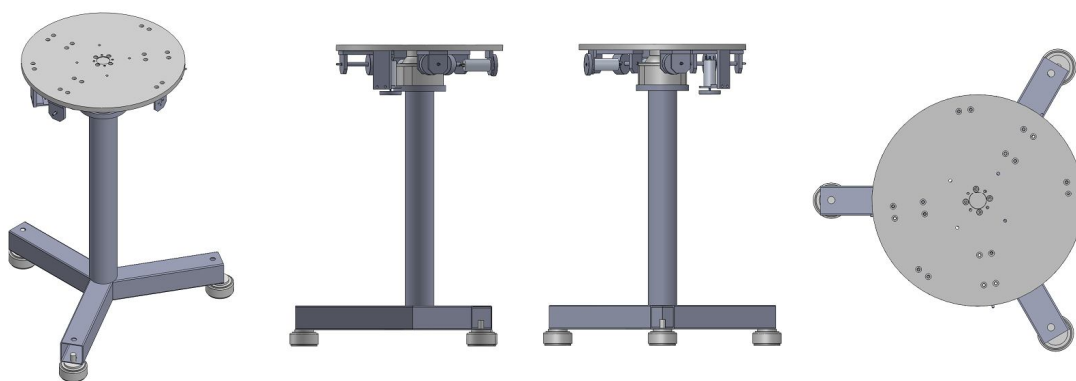


Figura 27: Figura com Todos os Componentes Projetados em Diversos Ângulos

A Fig. 28 mostra a vista explodida da mesa de atitude com o indicativo dos componentes na tabela 2.

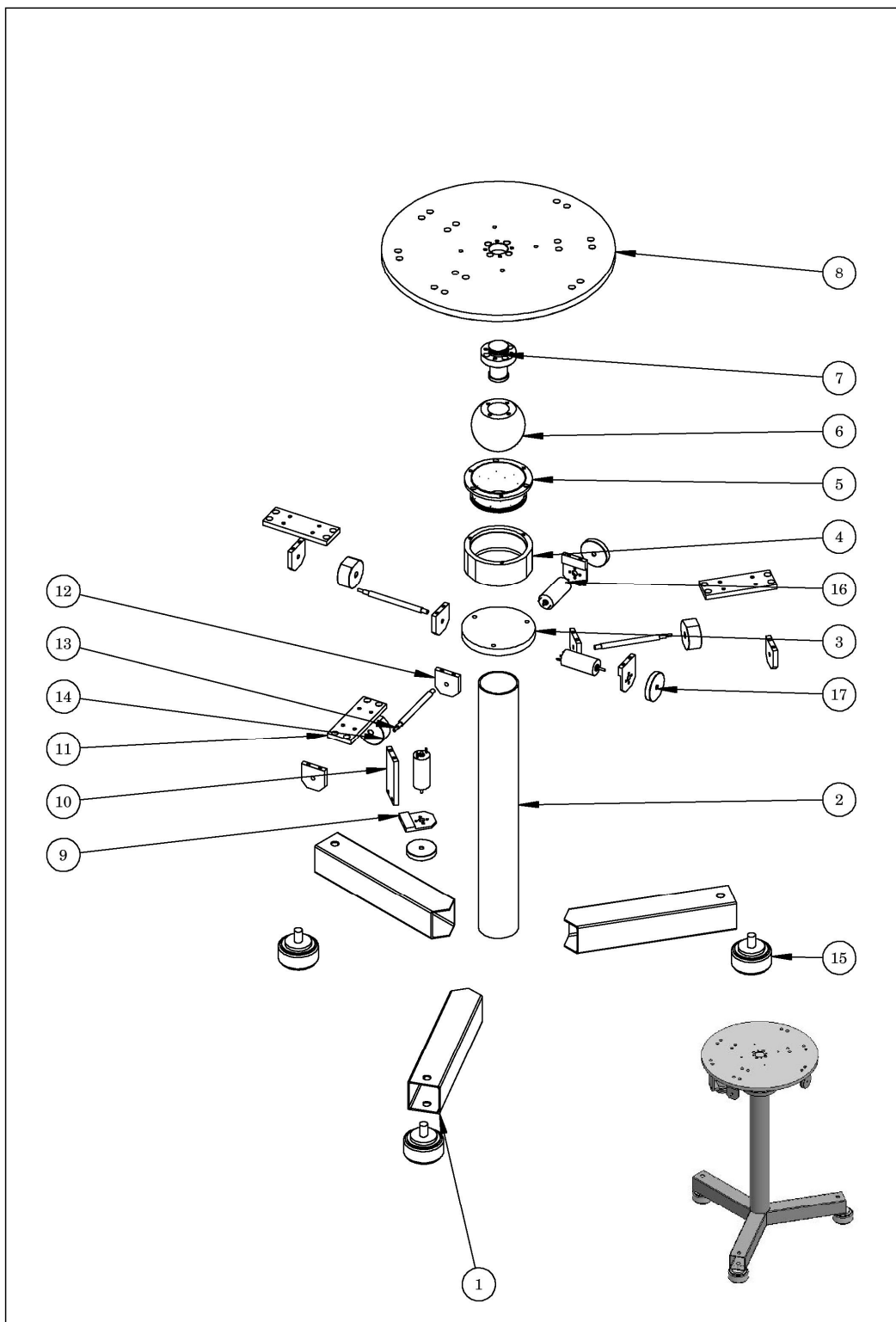


Figura 28: Visão explodida com lista de materiais subsequente

Tabela 2: Relação dos Materiais e das Quantidades

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	Material	QTD.
1	Tubo Horizontal Base	Aço 1020	3
2	Tubo Vertical	Aço 1045	1
3	Interface Mancal e Haste	Aço 1020	1
4	Carcaça Externa Mancal	Al. 7070	1
5	Estator Mancal	Al. 7070	1
6	Esfera do mancal	Al. 7070	1
7	Eixo de Acoplamento Esfera - Mesa	Aço 1020	1
8	Mesa de Reação	Al. 7070	1
9	Flange dos motores X-Y	Al. 2020	3
10	Suporte do motor Z	Al. 2020	1
11	Suporte do contra peso	Al. 2020	3
12	Suporte do contra peso	Al. 2020	6
13	Fuso contra peso	Aço 1020	3
14	Contra peso	Aço 1020	3
15	Vibra stop	Comercial	3
16	Motor	Comercial	3
17	Massas Inerciais	Aço 1020	3

Por fim, temos a estrutura montada com eletrônica embarcada (Fig. 29)



Figura 29: Estrutura Montada com Eletrônica

3.6.2 Eletrônica

Dentre os microcontroladores disponíveis no mercado, nota-se a crescente difusão da placa italiana Arduino. Trata-se de um controlador robusto que oferece portas digitais simples (sendo input ou output), portas digitais com opção de PWM, e portas analógicas de input. Um biblioteca (arduino.cc) diversificada, facilidade de programação e facilidade de encontrá-la no mercado são as razões de sua escolha, escolheu-se Arduino Mega (Fig. 30) pois apresenta maior quantidade de portas analógicas e digitais para conexão.



Figura 30: Arduino Mega 2560

Driver L298

O driver de potência para motor DC mais difundido no mercado é o L298 (L298 Full Dual Bridge, 2000). Este driver permite a duas entradas digitais do tipo TTL (HIGH e LOW oferecidas pelo Arduino), a possibilidade de inverter o sentido de giro do motor com mesmas conexões elétricas, sem trocar os terminais da bateria.

Cada driver oferece dois canais internamente, cada canal suporta até 2A de operação, ou ainda caso sejam ligados em paralelo suportam 4A. A Fig. 31 mostra detalhamento interno do driver L298.

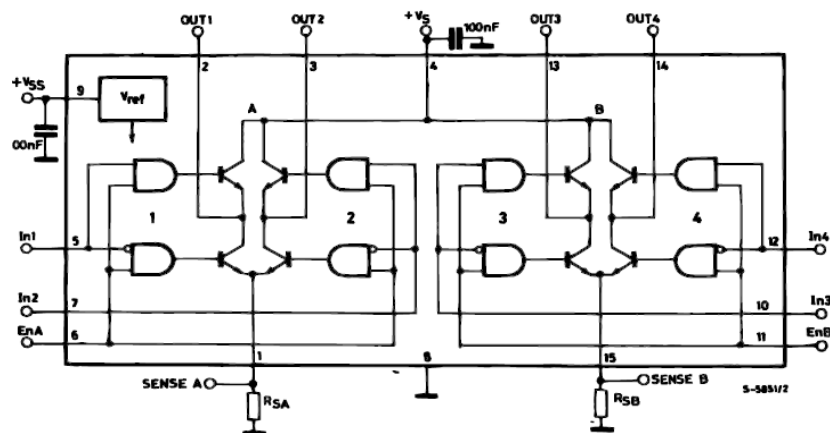


Figura 31: Diagrama do Circuito Integrado L298 (Datasheet L298, 2000)

A tabela 3 ilustra o comportamento, já levando em consideração os pinos do circuito integrado assumindo entrada V-Enable (pino 6)=HIGH:

Tabela 3: Entradas digitais e Respectivo Comportamento

Entradas Digitais		
IN1(pino 5)	IN2(pino 7)	Resposta
1	1	Motor parado
1	0	Giro horário
0	1	Giro anti-horário
0	0	Motor parado

A tabela 4, ilustra o exemplo para segundo canal, assumindo entrada V- Enable (pino 11) =HIGH:

Tabela 4: Entradas Digitais e Respectivo Comportamento

Entradas Digitais		
IN1(pino 10)	IN2(pino 12)	Resposta
1	1	Motor parado
1	0	Giro horário
0	1	Giro anti-horário
0	0	Motor parado

A representação da Fig. 32 ilustra como são as ligações de um canal do driver para um motor DC:

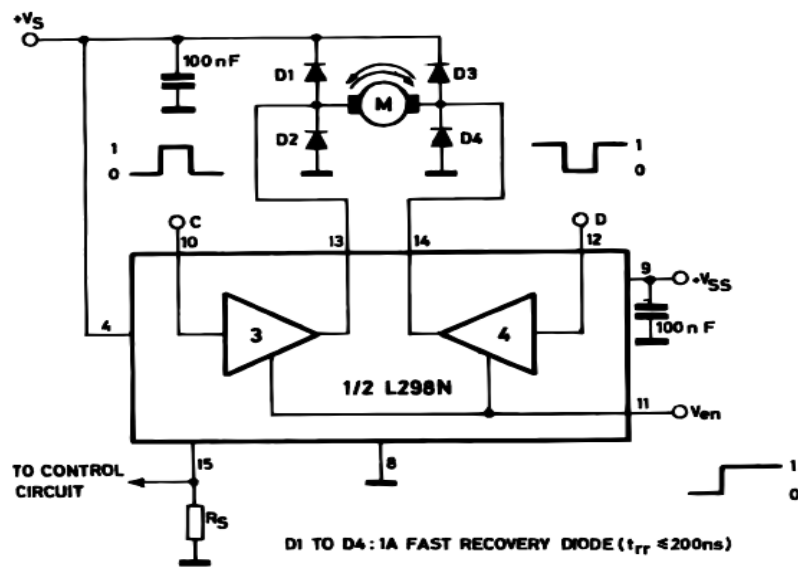


Figura 32: Ilustração de conexão interna e externa de um canal (Datasheet L298, 2000).

A Fig. 33 mostra o driver comercial que foi adquirido neste projeto.

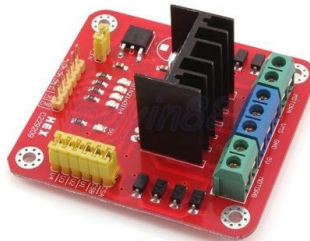


Figura 33: Placa do Driver Comercial com Conexões do L298

Diodo

O datasheet do circuito integrado L298 não faz menção ao diodo a ser utilizado, apenas que deve ser um diodo rápido, com tempo de chaveamento $< 200\text{ns}$. Assim optamos pelo modelo 1N5819 (1N5817 - 1N5819 Schottky Barrier Rectifier, 2010) trata-se de um diodo do tipo shottky que atende a essas características.

Capacitor

Neste circuito os capacitores tem função de amenizar alguma possível variação brusca da tensão da fonte, foram utilizados capacitores de 100nF tanto entre Gnd e 5v como entre Gnd e 12v.

Lembrando que, tratando-se de um driver de potência existem medidas necessárias para evitar superaquecimento, assim também será aplicado o uso de aletas dissipadoras embutidas neste circuito integrado, não menos importante é o uso de pasta térmica entre o CI e a aleta, para facilitar a condução do calor entre ambas as partes. A aleta deve ser utilizada na posição com os perfis do alumínio na vertical para que ocorra em toda esta superfície a transmissão do calor por convecção para o ar.

CI 7805

Circuito Integrado responsável por baixar a tensão de 12V da bateria em 5V de saída (LM78XX Datasheet, 2013).

Fonte

Uma bateria 12V preenche os requisitos necessários do projeto e deve ser ela sua matriz de energia. A partir dela podemos ter os referenciais:

0V (Gnd): referência do sistema

5V: Com auxílio do CI 7805, funcionará principalmente sinais lógicos e alimentação de circuitos – integrados e sensores.

12V: alimentação do motor DC

Motor

A escolha do motor se fez principalmente com o critério de requisito de projeto, para ser utilizado na calibração de sistemas de navegação, deve-se girar a velocidade bem reduzida, sendo também importante a escolha de um motor já acoplado a um encoder. Deste modo optou-se por um motor com redutor, obtendo baixa rotação do eixo final como 8.6 rpm. Assim escolhemos o motor Mitsumi da Fig. 34.



Figura 34: Da Esquerda para Direita, Redução, Motor e Encoder Conectados

Tabela 5: Dados do Motor

<u>Características do Motor</u>		
DC	Redução 1:500	Encoder de 334 linhas/ciclo
4300 rpm	12 kg.cm	12V

Analisando dados da Tabela 5, o eixo de saída com a redução, o giro o eixo de saída com a redução é 8.6 rpm.

Encoder

O encoder é um sensor capaz de converter movimentos rotativos em pulsos elétricos em razão do eixo ao qual está acoplado, e obtêm duas grandes classificações: Incremental e Absoluto. Normalmente os pulsos elétricos são medidos por dois canais (A e B), e se tratam de ondas quadradas

O encoder incremental possui um circuito eletrônico mais simples, pois visam informar velocidade e sentido de rotação, não tendo a propriedade de memorizar um posicionamento.

O encoder absoluto pode memorizar posicionamentos, informar velocidade e sentido de rotação, sendo utilizados em aplicações de maior precisão e onde seja necessário armazenar posicionamento como em robótica por exemplo.

O encoder utilizado é do tipo neste caso do tipo incremental. A razão de existirem dois canais de medida é a possibilidade de se conhecer o sentido do giro do motor através da comparação

do canal A com o canal B. Uma vez colhidas as informações de pulsos, também é possível calcular a velocidade angular.

Como pudemos ver pela foto do motor (Fig. 34), o sistema é sequencialmente, encoder motor e redução. Assim, a medida do encoder terá o significado de velocidade do motor sem redução, para calcularmos a velocidade angular real de saída devemos multiplicar pela relação de redução (1/500). Este encoder apresenta 334 linhas por giro, que significa 334 pulsos por giro.

Sensor de Giros

GY-521



Figura 35: Sensor de Giros modelo GY 521

Sensor de giros são capazes de avaliar movimentos de rotação e mudanças de orientação de um corpo, o princípio de funcionamento é a força de Coriolis. A Fig. 36 ilustra um modelo simplificado, seus elementos ilustrados são estator e braços de vibração em forma de T. Uma vibração nos braços simultânea a um giro no mecanismo causa vibração vertical dos braços devido a força inercial de Coriolis. A vibração vertical induz a torção do braço sensível que gera uma diferença de potencial, assim velocidade angular foi transformada em pulso elétrico.

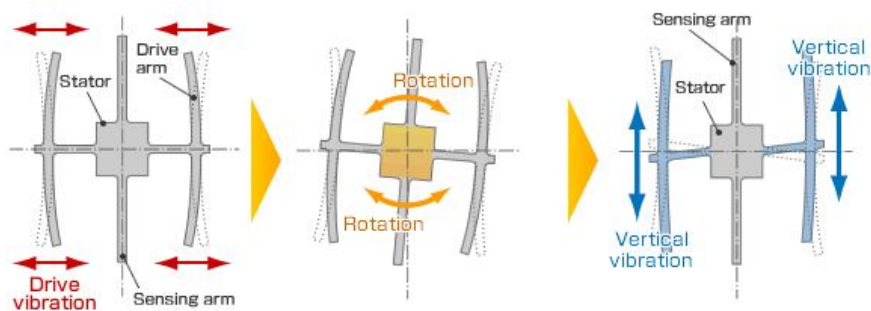


Figura 36: Modelo simplificado de um Sensor de Giros (Gyros Sensor - How They Work. Epson. <http://www5.epsondevice.com/en/sensing_device/gyroportal/about.html>).

Segundo a especificação o KVH tem acurácia de $1^\circ/\text{h}$, a recomendação padrão de projeto é que devemos ter um sensor com acurácia de pelo menos $0.1^\circ/\text{h}$ ($=1/10 \cdot 1^\circ/\text{h}$). Devido razões de alto custo para sensores desta escala e devido a ser um primeiro trabalho nesta área dentro do Departamento da Universidade, foi adquirido o sensor GY 521 (Fig. 35) (circuito já montado com base no MPU - 6050), que não atende a restrições desejadas $0.1^\circ/\text{h}$ de projeto, porém o sensor tem acurácia de $1/131^\circ/\text{s} = (0,45^\circ/\text{h})$ (MPU6050 datasheet, 2011). Mesmo assim, permitirá inferirmos conclusões significativas sobre os resultados do trabalho. O sensor ilustrado é capaz de medir variações de aceleração, assim como velocidade angular. Caberia como sugestão de trabalho futuro, a substituição do sensor de giros, por um sensor de melhor acurácia, em outras palavras, é difícil haver um único sensor que calibrasse todas as IMUs, mas de acordo com a IMU, existe um sensor com acurácia mais adequada a faixa de operação da velocidade requerida para aferição.

A ligação do sensor GY521 se faz da forma como ilustra Fig. 37:

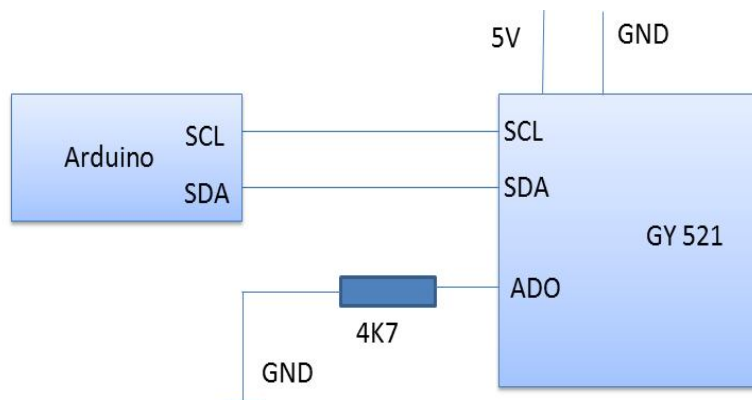


Figura 37: ligação sensor Giros GY 521

Portanto, encontra-se a tabela 6 que é completar a tabela 2:

Tabela 6: Continuação da Tabela 2, com Componentes Eletrônicos.

Nº do Item	Descrição
18	Motor DC + Encoder

19	placa de ilhas
20	Conectores
21	Cabos elétricos: 20m
22	Microcontrolador Arduino
23	placa de acrílico
24	Aletas Dissipadoras
25	Headers, Resistores, Solda
26	12 diodos 1N5819
27	Guias lineares para balanceamento
28	Parafusos, Porcas
29	1 Botão On-Off
30	Bateria de moto 12V
31	Restritores
32	Soquetes,
33	Capacitores de 100nF

3.6.3 Programação Arduino

O ciclo funciona da seguinte forma, envia ordens aos drivers para giro do motor, para visualização do comportamento da mesa em relação ao giro das cargas inerciais, também monitora encoders e sensor de giros.

4. ENSAIO E RESULTADOS

Os dados poderiam ser colhidos diretamente do microcontrolador via entrada USB, porém um fio entre o microcontrolador e um notebook não embarcado pode influenciar o desempenho, um notebook embarcado a mesa de reação afetaria o movimento estudado, acarretaria em alteração do centro de gravidade, além de ser uma fonte de ruído eletrônico no processo. Desta forma foi escolhida uma extensão do microcontrolador para salvar os dados, que possibilita salvá-los em um cartão SD (Fig. 38). Assim a metodologia utilizada para os experimentos 1 e 2, foi realizar cada experimento salvando-o no cartão SD, e em um segundo momento a retirada do cartão SD e leitura do cartão em um notebook.

O Arduino faz coleta de dados, utilizando sua própria biblioteca (<http://arduino.cc/en/Tutorial/Files>), escolhemos salvar os dados em um arquivo txt, espaçando por , (vírgula) cada dado, e pulando linha em cada coleta, desta forma, ao abri-lo no Excel, cada coleta se torna linha e cada variável do sensor se torna coluna em uma planilha.



Figura 38: Módulo de Leitura e Escrita de Cartão SD

Temos como meta os seguintes experimentos:

Experimento 1 – Motor Z e Coleta de Dados pelo Encoder:

Neste experimento, foi feita a ligação entre Motor DC, driver L298, Encoder, Arduino fazendo leitura do Encoder e manda informação da posição para um notebook via entrada USB (Fig. 39).

O encoder do motor oferece 334 pontos/ volta, a leitura destes pontos esta sendo exposta no visor do notebook. O microcontrolador Arduino manda ordem de giro ao driver (IN1= HIGH,

IN2=LOW). Ao girar continuamente, o encoder acoplado ao motor, envia sinais as portas de entrada do Arduino. A figura também ilustra bateria 12V alimentando o motor DC.

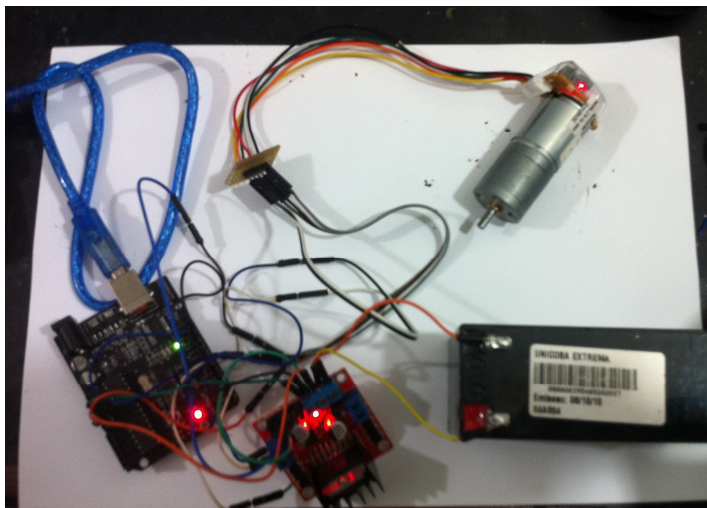


Figura 39: Teste de Driver, Arduino e Motor sem Carga

Entrada degrau de 12V aplicada no motor Z, como mostra o Gráfico Tensão (V) x Tempo (s) a Fig. 40.

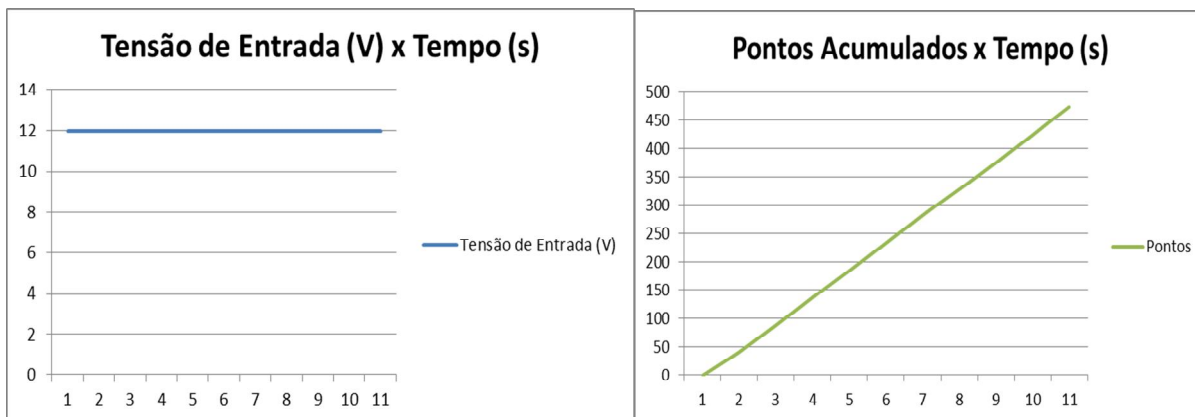


Figura 40: Gráfico de Entrada em Volts no motor Z e Gráfico de Saída em Pontos

O Gráfico de Saída da Fig. 40 indica leitura do Encoder do tipo incremental, assim o gráfico mostra que cada pulso é incrementado sequencialmente, sem termos conhecimento da posição.

Experimento 2 – Entrada Degrau no Motor Z Acoplado e Coleta de Dados.

Antes de fazermos o experimento de fato, é importante estabelecermos alguns valores de variáveis na geometria da mesa (Fig. 41). X e Y ortogonais com Z formando uma base no espaço. Existe um motor no eixo x, um motor no eixo y e outro no eixo Z. Definidos ainda como Alpha X a velocidade angular em torno do eixo X, Alpha Y como velocidade angular em torno do eixo Y, e Alpha Z como velocidade angular em torno do eixo Z assumindo regra da mão direita para as três variáveis.

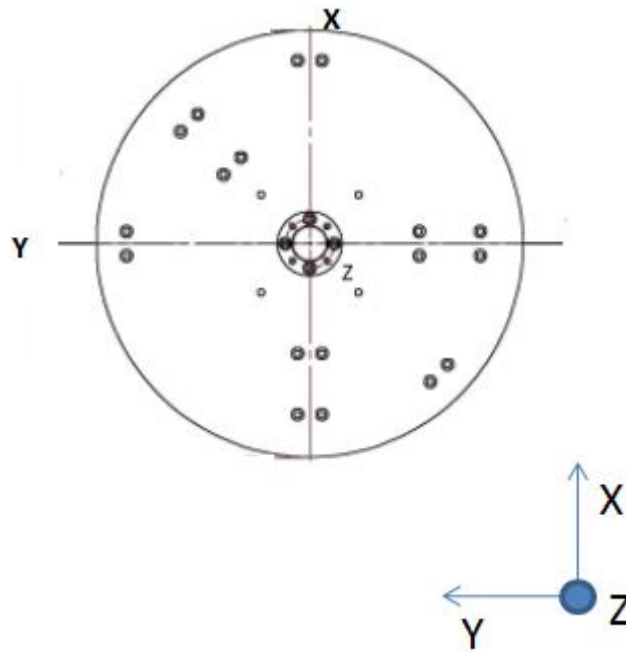


Figura 41: base de referência para a mesa

O experimento foi uma entrada degrau de 12V aplicada no motor Z, como mostra o gráfico Tensão (V) x Tempo (s) da Fig. 42. Foram encontradas algumas dificuldades, o mancal funcionou bem, deixando a mesa realmente com atrito próximo de zero, porém houve dificuldade em balancear estaticamente a mesa de modo a fazê-la entrar em equilíbrio. Optou-se por um começar com a pressão zero, e gradativamente aumentá-la até a camada de ar ocupar uma camada entre esfera e mancal.

Observou-se que com a formação da camada de ar, a mesa inclinou-se totalmente, pois o atrito colaborava para seu equilíbrio, como a Fig. 43

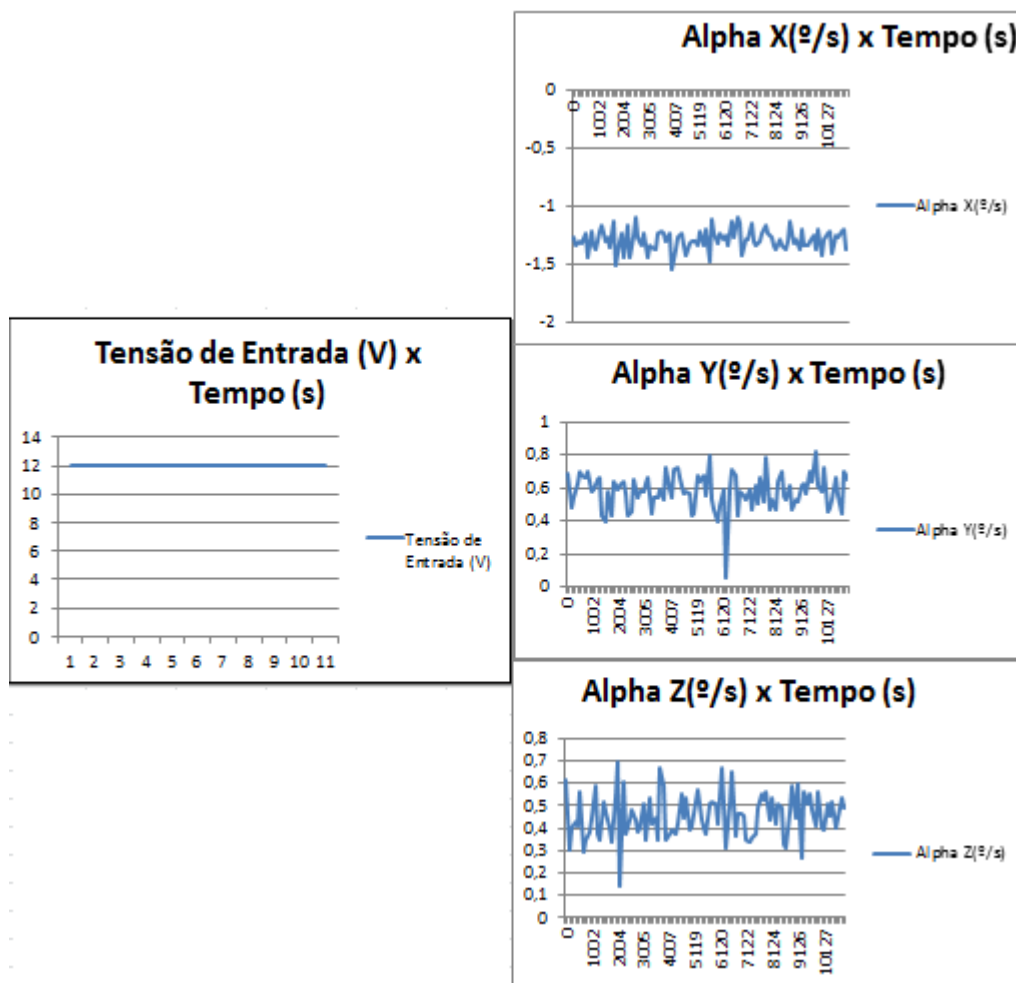


Figura 42: Gráficos da Entrada em Volts, e Saída dos Valores de Velocidade Angular

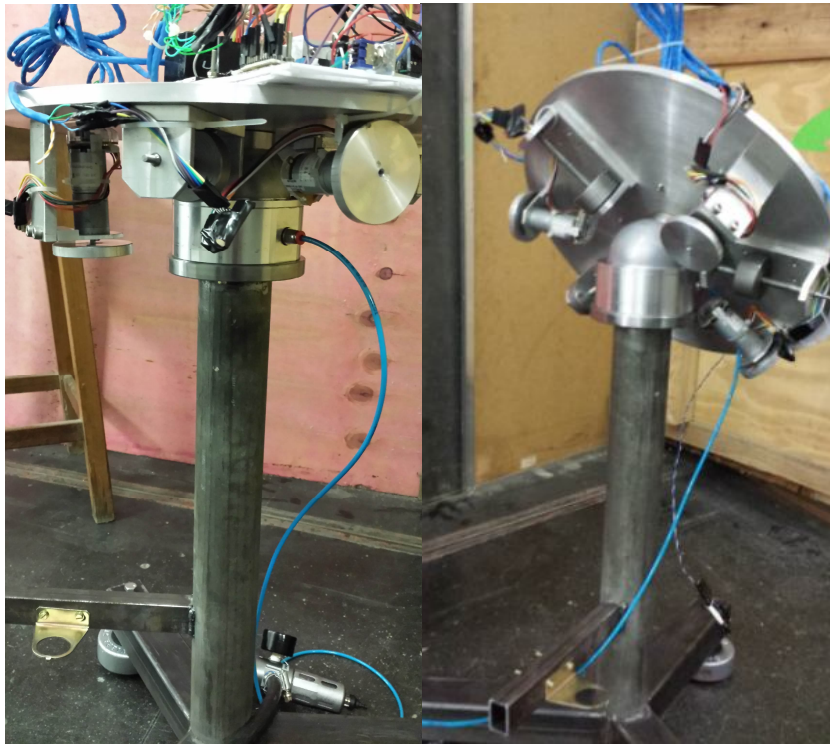


Figura 43: Experimento 2

:

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Experimento 1 – Motor Z e Coleta de Dados pelo Encoder:

No experimento 1, do encoder obtivemos 475 pontos em 10s de experimento, ao considerarmos a especificação 334 pontos/ volta, o valor é próximo ao esperado já que o valor esperado seria 479 pontos.

Experimento 2 – Entrada Degrau no Motor Z Acoplado e Coleta de Dados.

No experimento 2, houve grande dificuldade em encontrar equilíbrio dinâmico da mesa, uma vez que circulava ar pelo mancal aerostático, então foi feita a coleta de dados da mesa com motor Z girando, porém sem movimento da mesa devido ao atrito estático, mas os dados servem para avaliar a funcionalidade da eletrônica e também dos ruídos que foram encontrados. Este experimento ocorrido demonstra que o mancal funciona corretamente, e deixa a interface mancal-estator com atrito praticamente zero. Como a mesa estava parada, não é de se esperar valores para giros em z, y, x, porém os sensores acusam os valores que representam puramente ruídos, como os gráficos da Fig. 42.

Este foi um trabalho pioneiro no departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica englobando desenvolvimento de mancal esférico aerostático e coleta de dados por sensores de uma mesa de reação. A Estrutura demonstrou suportar a mesa e o mancal, e também o apoio em três pontos mostrou estabilidade. O mancal teve bom comportamento e atingiram as expectativas acima das desejadas, ao suportar o peso da mesa e demonstrar ter capacidade de carga muito maior. A eletrônica também se demonstrou de bom funcionamento ao colher dados consistentes e operar sem dificuldades. Assim, os objetivos foram atingidos, considerando que é o primeiro trabalho do gênero do departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, os resultados foram satisfatórios.

5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, cabe estudo e avaliação de possíveis mudanças da mesa para facilitar o balanceamento estático e dinâmico.

Também seria válida iniciativa de determinar a atitude do simulador causada por um impulso externo, e posteriormente fazer sua estabilização.

Outra sugestão seria a substituição do sensor de giros, por um sensor de melhor acurácia, em outras palavras, é difícil haver um único sensor que calibrasse todas as IMUs, mas de acordo com a IMU, existe um sensor com acurácia mais adequada a faixa de operação da velocidade requerida para aferição.

Considerando este mesmo sensor, futuramente pode ser feita a implementação de um filtro para a coleta de sinais, de modo que os valores colhidos sejam mais estáveis.

REFERÊNCIAS

- [1] 1N5817 - 1N5819 Schottky Barrier Rectifier. 2010. Disponível em <<https://www.fairchildsemi.com/ds/1N/1N5818.pdf>>. Acessado em 28/09/2013.
- [2] Arduino. Manual, Datasheet, and Library. Disponível em <arduino.cc>. Acessado em 28/09/2013.
- [3] BABCOCK, ERIK P.; BRET, TIMOTHY. CubeSat Attitude Determination Via Kalman Filtering of Magnetometer and Solar Cell Data. 25^o Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. University of Illinois, Urbana – Champaign. 2011
- [4] Euler Angles. Disponível em <<http://www.quickikiwiki.com/en/Roll-pitch-yaw>>. Acessado em 28/09/2013
- [5] FLEURY, Agenor de Toledo; SOUZA, Petrônio Noronha de; TRIVELAT, Gilberto da Cunha. Simulação e Testes de Sistemas de Controle de Atitude e órbitas de Satélites: Considerações Gerais Sobre um Caso Exemplo (INPE) e Projeto de Uma Mesa de Rotação Controlada. SBA: Controle & Automação, Vol. I, Nº 3, pp. 216-224. São José dos Campos. 1987
- [6] Gyros Sensor - How They Work. Epson. <http://www5.epsondevice.com/en/sensing_device/gyroportal/about.html>. Acessado em 10/11/2013.
- [7] HUANG, Wenling; YUAN, Bincheng. Automatic Test System for Attitude Control System of AUV. Wuhan, China. Pags. 227-231. 2009
- [8] HUI LI, Xiaogang Jing, Wanyu Zhuang. Study On Simulation Of Launch Vehicle Attitude Control System. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation Niagara Falls, Canada. School of Mechatronics Electronics Engineering - University of Electronic Science and Technology of China. China. 2005.
- [9] KAZUFUMI Fukuda; YUJI Sakamoto; TOSHINORI Kuwahara; KAZUYA Yoshida; Yukihiro Takahashi. Static Closed Loop Test System for Attitude Control System of Micro Satellite RISING-2. Pags. 890-895. 2011

- [10] KOMANDURI, Ananth ; JUNIOR, Gilberto Arantes ; FILHO, Luiz S. Martins. Controle de Atitude e Posição para um Simulador Experimental de Satélite Artificial. Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications. Serra Negra.2010
- [11] KVH CG-5100 Inertial Measurement Unit (IMU). Technical Manual. 2010.
- [12] L298, Dual Full Bridge Driver. STMicroelectronics. Disponível em <<http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000240.pdf>>. Acessado em 27/09/2013.
- [13] LIMA, S. R. Integração gps-ins utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos.2005
- [14] LM78XX Datasheet. Farchild Semiconductor. Disponível em<<http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf>>. Acessado em 27/09/2013.
- [15] Manual de Oslo. Finep. 2004 Disponível em <http://download.finep.gov.br/imprensa/manual_de_oslo.pdf>. Acessado em 27/09/2013.
- [16] Manual Frascati. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. Disponível em <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0023/23423.pdf>. Acessado em 27/09/2013.
- [17] MOSER, Johannes Ney; NETO, Mauro Speranza .Desenvolvimento de Simuladores de Movimento para Análise e Visualização da Dinâmica de Veículos. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2012.
- [18] MPU6050. Disponível em <<http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-6000A-00v3.4.pdf>>. Acessado em 27/09/2013.
- [19] RAKWAL, Dinesh. BAMBERG, Eberhard. Design Guidelines for Spherical Aerostatic Bearings. University of Utah. USA.
- [20] ROSENFELD, H.; FORCELLINI, F. A. Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo. 2006
- [21] SANTANA, D. D. Estimação de trajetórias terrestres utilizando unidades de medição inercial de baixo custo e fusão sensorial.2005
- [22] Secretária de Assuntos Estratégicos. Setor espacial terá R\$ 9 bi para formar mão de obra. 2013 Disponível em <<http://www.sae.gov.br/site/?p=15309>>. Acessado em 28/09/2013

- [23] SILVA, Luis Carlos de Albuquerque; TOSIN, Marcelo Carvalho. Software de um Simulador de Atitude. Dissertação de Mestrado. UEL-Londrina. 2008.
- [24] SILVA, Lucas Emídio Roque da. Calibração dos Acelerômetros de uma Unidade de Medição Inercial utilizando um Manipulador Robótico. Trabalho de Conclusão de Curso. UFMG. Belo Horizonte. 2010
- [25] SLOCUM, Alexander H. Precision Machine Design. Prentice Hall. 1992.
- [26] SOUZA, Janaina Fracaro de; ALMEIDA, Sérgio Frascino Müller de. Anteprojeto de um Simulador de Atitude com Mancal em Três Graus de Liberdade. Tese de Mestrado Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos. 2007
- [27] SOUZA, P.N. Análise, Projeto, Construção e Testes de um Modelo de Roda de Reação para Aplicações Espaciais. 1986. São José dos Campos.
- [28] VAN INGEN SCHENAU, H.A.; VAN RIJN, L.C.J.; SPAA, J.. Test and Verification Equipment for the Attitude & Orbit Control System of the XMM satellite. DASIA 98 Conference, Data Systems In Aerospace, organised by EUROSPACE, 25-28 May 1998. Athens, Greece. 1998
- [29] WANG, Junming. Design of Gas Bearing Systems for Precision Applications. 1993
- [30] WEINGAERTNER, W. L. Desenvolvimento na usinagem de ultraprecisão. 1992. Monografia UFSC. Florianópolis.

Apêndices

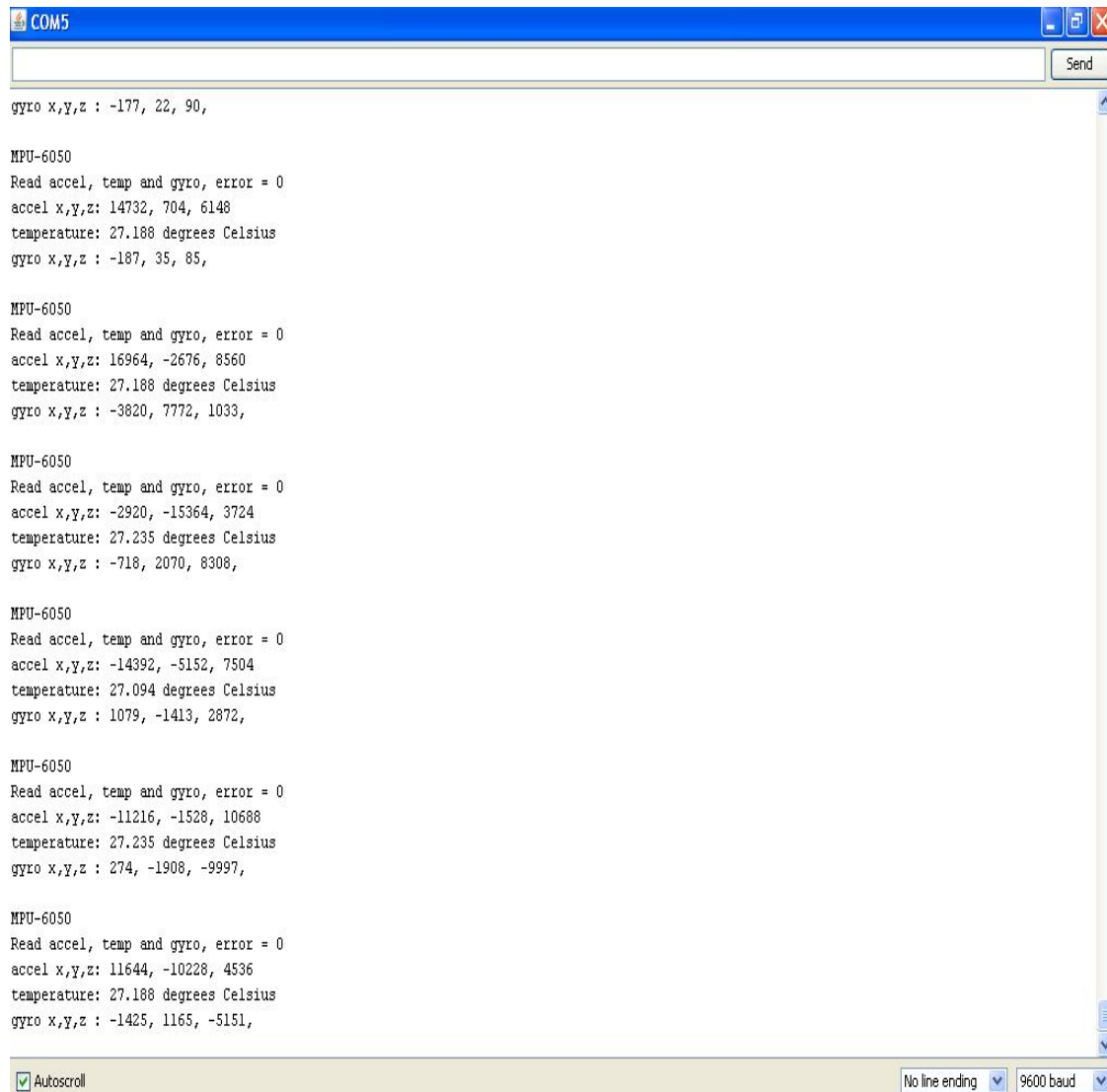
Apendice 1 – Experimento com Sensor de Giros

No momento em que a estrutura ainda não estava completamente pronta, foi feito este teste para avaliação do funcionamento do sensor de Giros.

De posse do sensor de giros, foi feita uma experiência para saber como é o funcionamento do sensor, usamos o sensor GY521, e o microcontrolador Arduino conectado via USB. A seguir, é ilustrado os componentes macro:



Uma vez unidos os componentes, tivemos a seguinte interface, que demonstrava os dados colhidos do sensor (Fig. 44):



```
COM5

Send

gyro x,y,z : -177, 22, 90,

MPU-6050
Read accel, temp and gyro, error = 0
accel x,y,z: 14732, 704, 6148
temperature: 27.188 degrees Celsius
gyro x,y,z : -187, 35, 85,

MPU-6050
Read accel, temp and gyro, error = 0
accel x,y,z: 16964, -2676, 8560
temperature: 27.188 degrees Celsius
gyro x,y,z : -3820, 7772, 1033,

MPU-6050
Read accel, temp and gyro, error = 0
accel x,y,z: -2920, -15364, 3724
temperature: 27.235 degrees Celsius
gyro x,y,z : -718, 2070, 8308,

MPU-6050
Read accel, temp and gyro, error = 0
accel x,y,z: -14392, -5152, 7504
temperature: 27.094 degrees Celsius
gyro x,y,z : 1079, -1413, 2872,

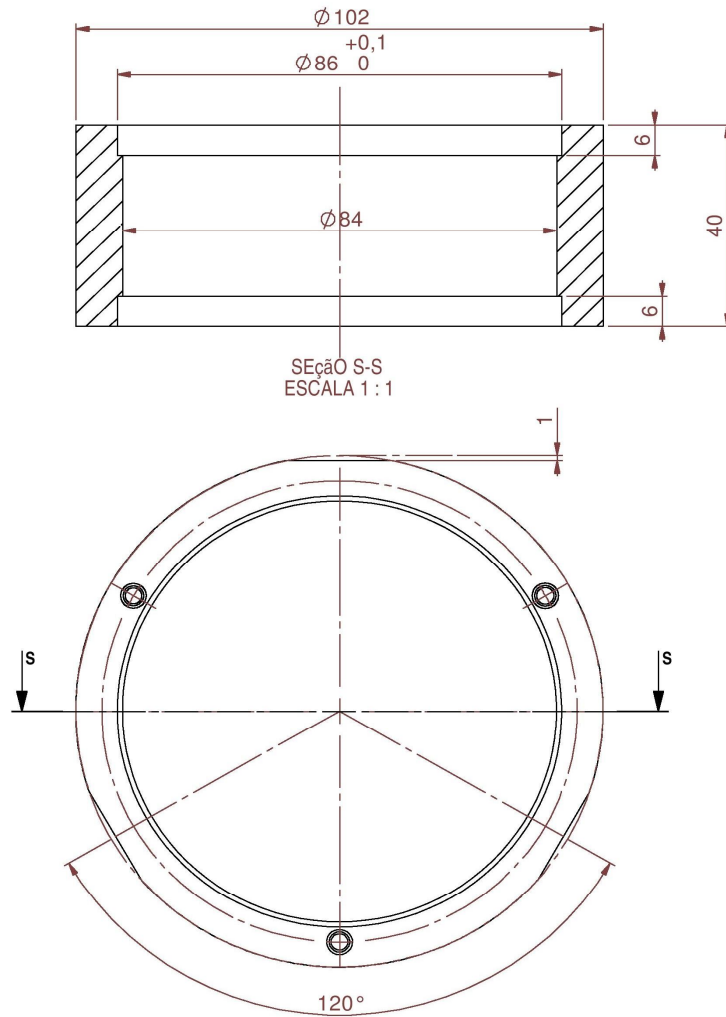
MPU-6050
Read accel, temp and gyro, error = 0
accel x,y,z: -11216, -1528, 10688
temperature: 27.235 degrees Celsius
gyro x,y,z : 274, -1908, -9997,

MPU-6050
Read accel, temp and gyro, error = 0
accel x,y,z: 11644, -10228, 4536
temperature: 27.188 degrees Celsius
gyro x,y,z : -1425, 1165, -5151,

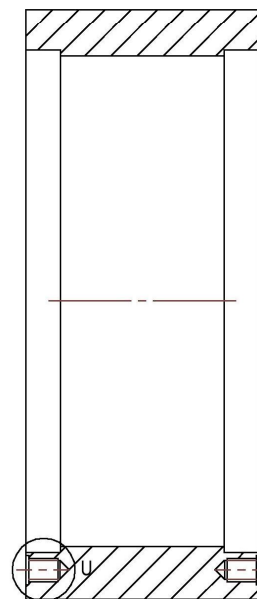
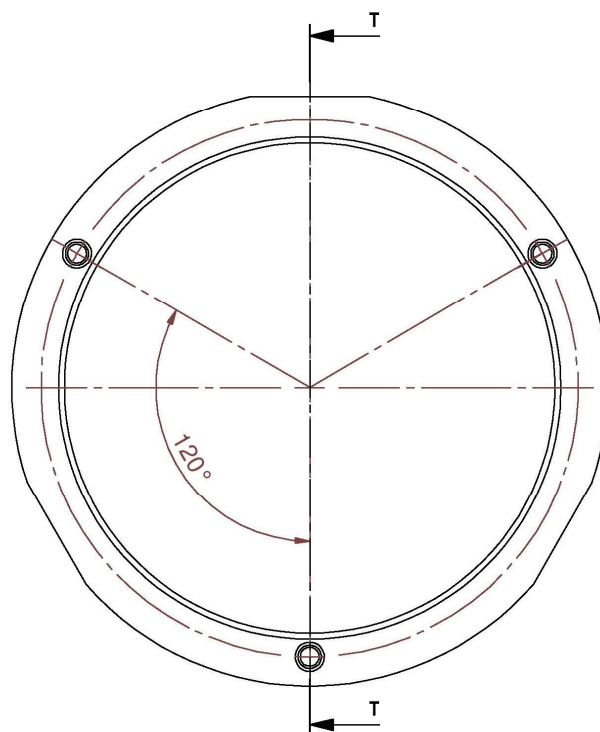
Autoscroll No line ending 9600 baud
```

Figura 44: Leitura do Sensor GY521

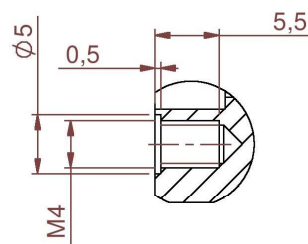
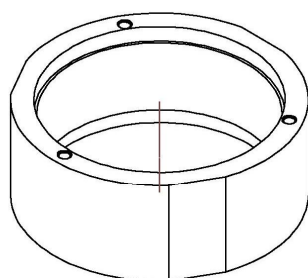
Anexos – Desenhos de Fabricação



					4			
Quantidade	Nome da Peça				Número da Peça		Material	
		DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)					Escala: 1:1	
		1 a ±0,1	6 a ±0,2	30 a ±0,3	120 a ±0,5	400 a ±0,8		1000 a ±1,2
		Desenho:				Data:		
		Responsável:				Revisão: 14/11/2013		
		Projeto: MicroScratch			Arquivo: P-5.1 - 1.SLDDRW			

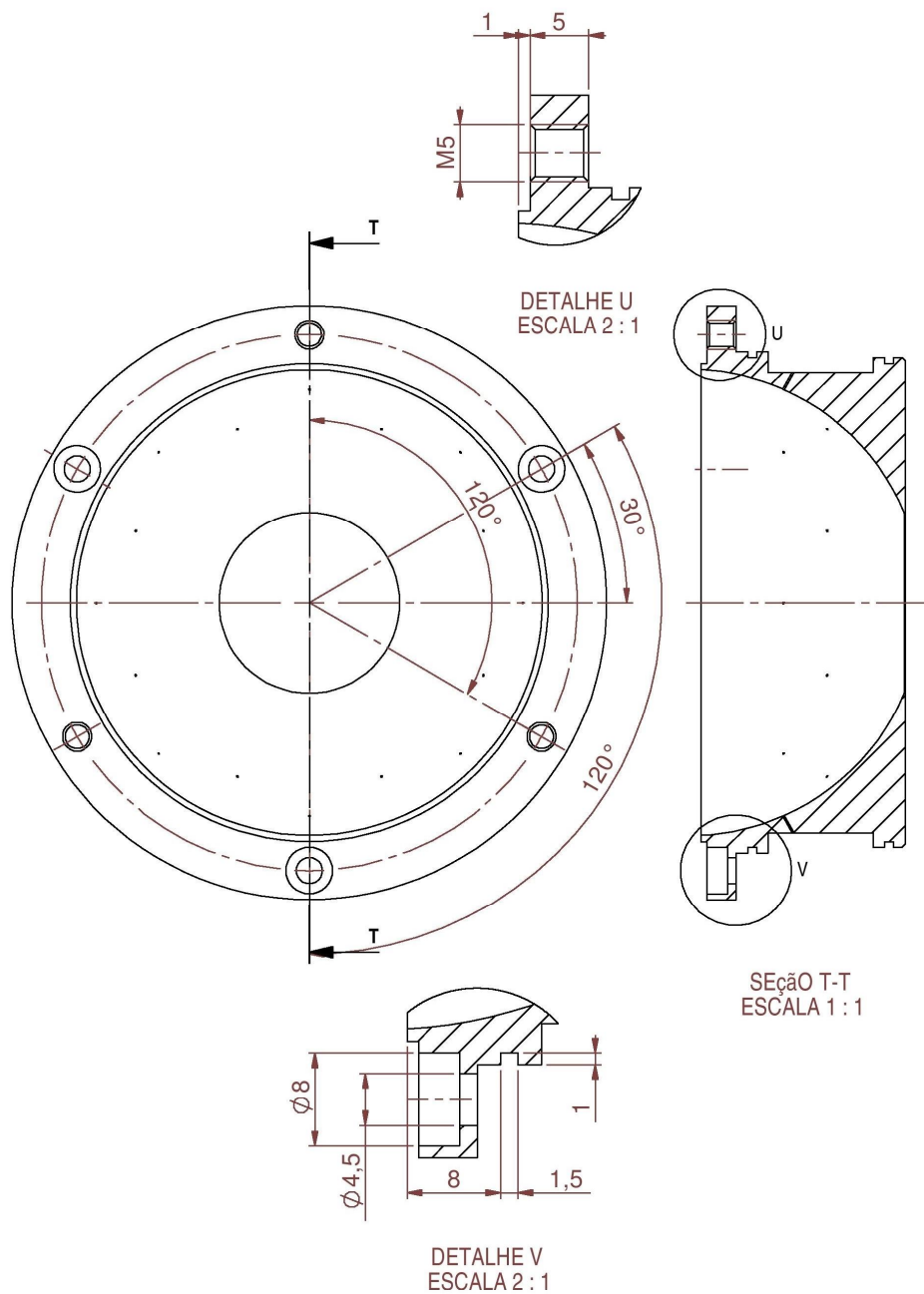


SEÇÃO T-T
ESCALA 1 : 1

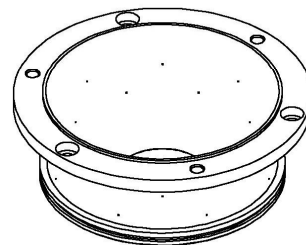


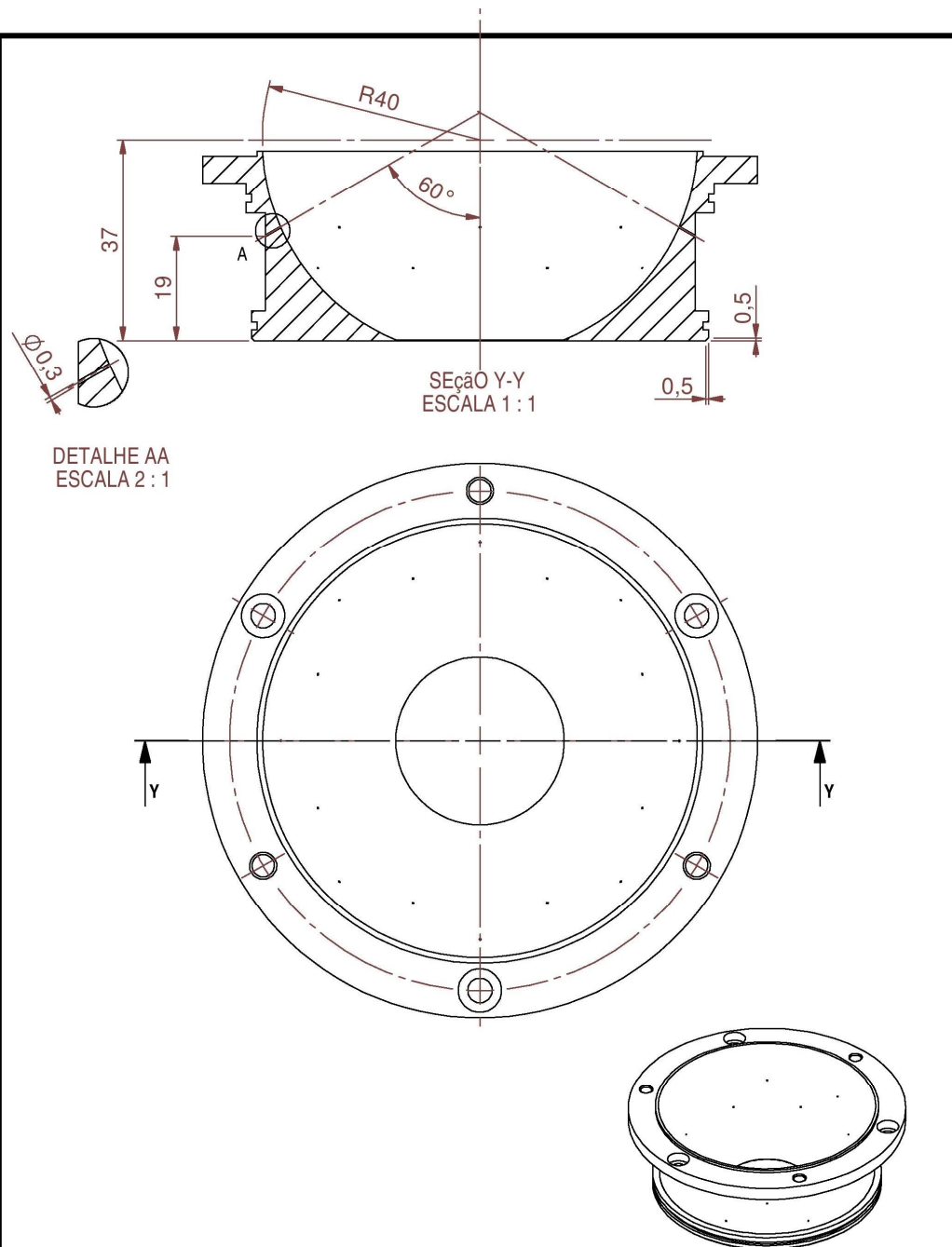
DETALHE U
ESCALA 2 : 1

pçs						4	Alumínio
Quantidade	Nome da Peça					Número da Peça	Material
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)					Escala: 1:1	
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	120 a 400 ±0,5	400 a 1000 ±0,8		
	Desenho:					Data:	
	Responsável:					Revisão: 14/11/2013	
	Projeto: MicroScratch					Arquivo: P-5.1 - 2.SLDDRW	

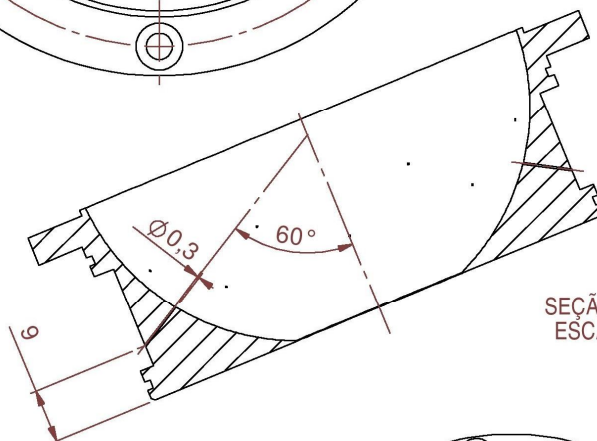
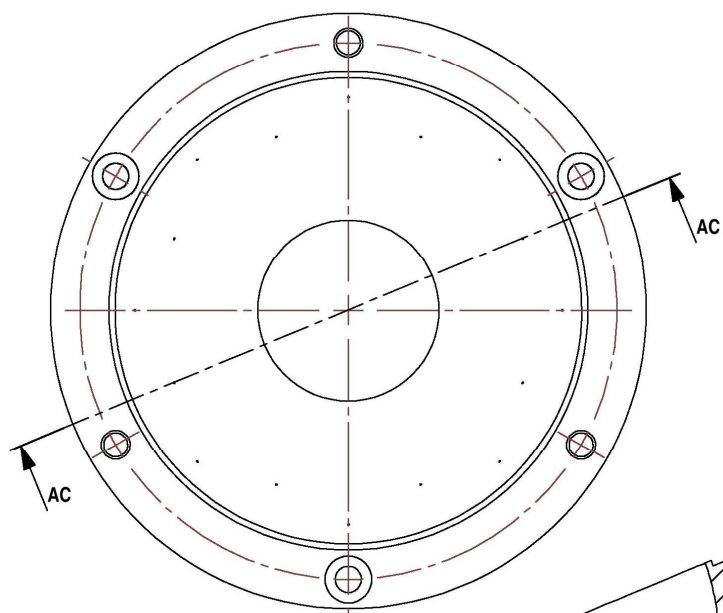


		5				
Quantidade	Nome da Peça				Número da Peça	Material
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)					Escala: 1:1
	1 a ±0,1	6 a ±0,2	30 a ±0,3	120 a ±0,5	400 a ±0,8	
					1000 a ±1,2	
	Desenho:				Data:	
	Responsável:				Revisão: 14/11/2013	
	Projeto: MicroScratch				Arquivo: P-5.2 - 1.SLDDRW	

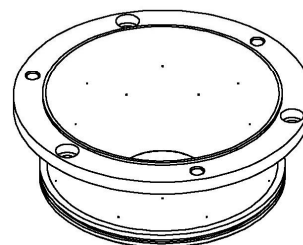




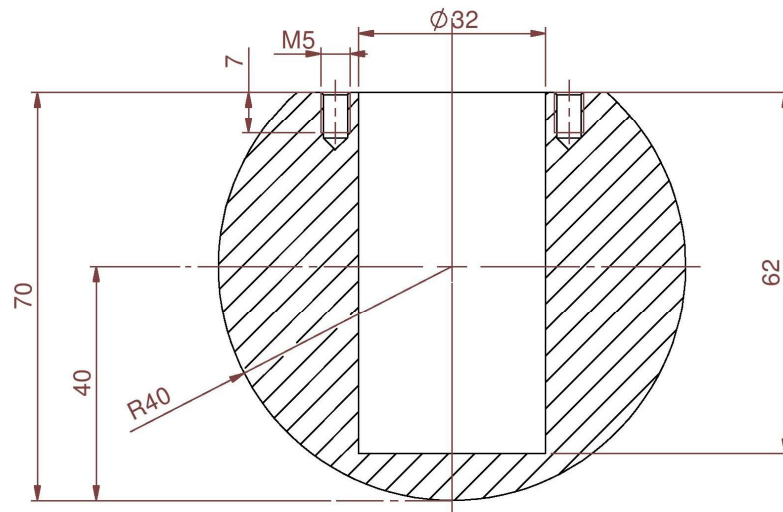
			5°				
Quantidade	Nome da Peça				Número da Peça		Material
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)						Escala: 1:1
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	120 a 400 ±0,5	400 a 1000 ±0,8	1000 a 2000 ±1,2	
	Desenho:				Data:		
	Responsável:				Revisão: 26/11/2013		
	Projeto:				Arquivo:		
	MicroScratch				P-5.2 - 3.SLDDRW		



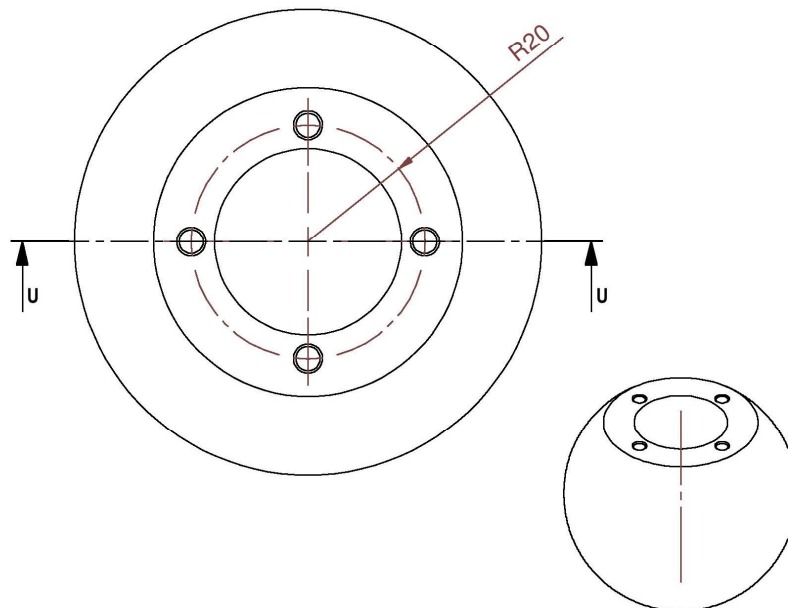
SEÇÃO AC-AC
ESCALA 1:1



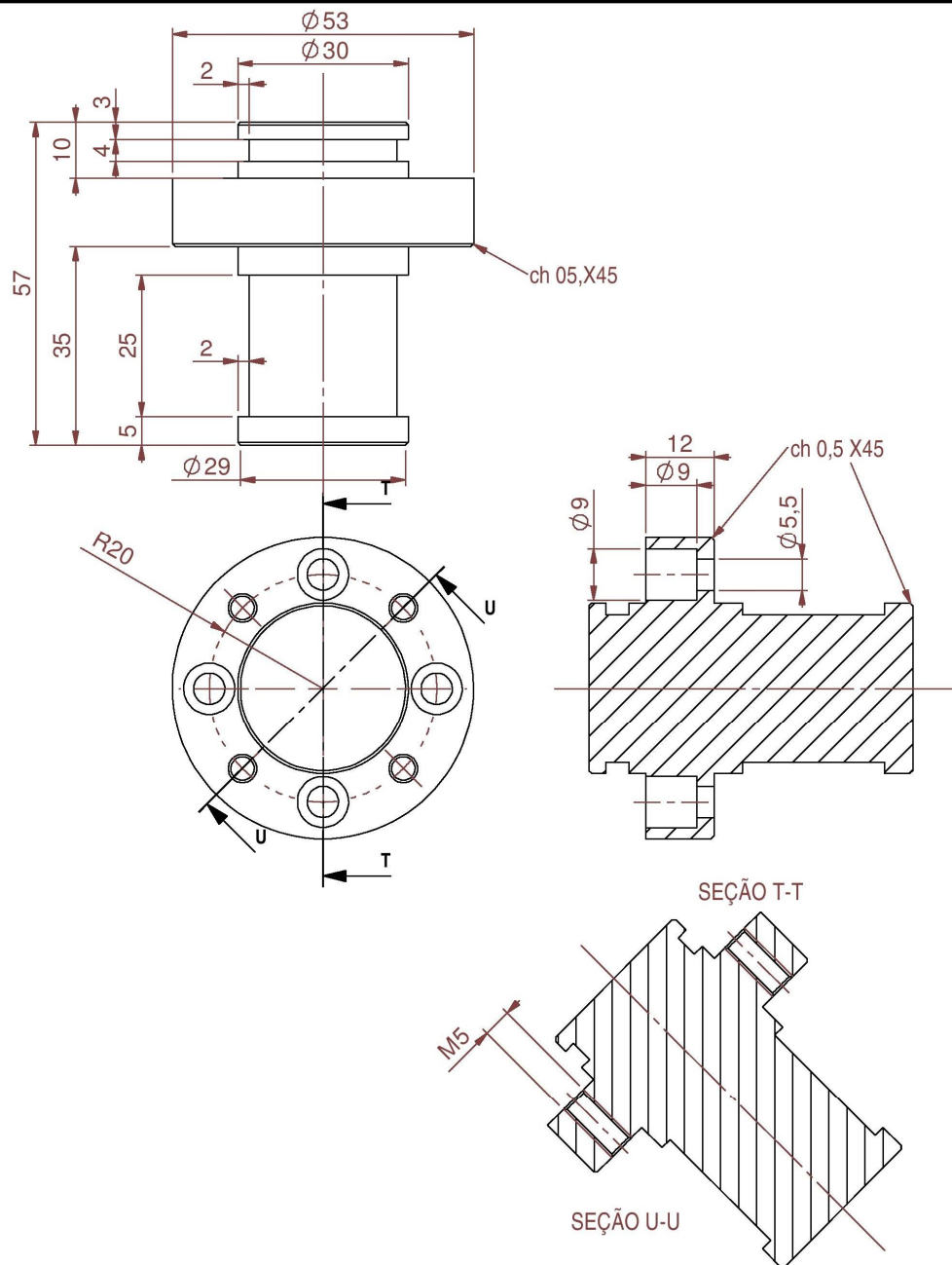
		5				
Quantidade	Nome da Peça				Número da Peça	Material
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)					Escala: 1:1
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	120 a 400 ±0,5	400 a 1000 ±0,8	
					1000 a 2000 ±1,2	
	Desenho:				Data:	
	Responsável:				Revisão: 26/11/2013	
	Projeto: MicroScratch				Arquivo: P-5.2 - 4.SLDDRW	



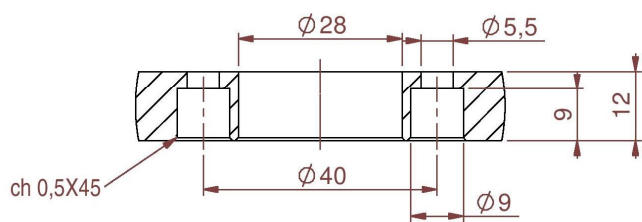
SEÇÃO U-U
ESCALA 1 : 1



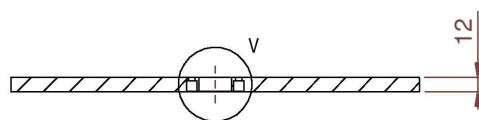
			6	
Quantidade	Nome da Peça		Número da Peça	Material
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)			Escala: 1:1
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	
			120 a 400 ±0,5	
			400 a 1000 ±0,8	
			1000 a 2000 ±1,2	
	Desenho:	Data:		
	Responsável:	Revisão: 14/11/2013		
	Projeto: MicroScratch	Arquivo: P-5.4 - 1.SLDDRW		



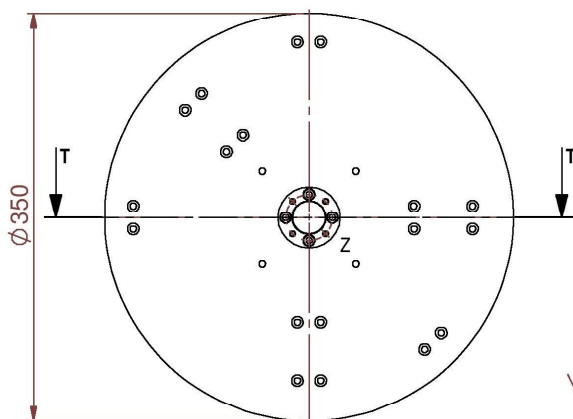
		7	
Quantidade	Nome da Peça	Número da Peça	Material
DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)			Escala: 1:1
1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	
120 a 400 ±0,5	400 a 1000 ±0,8	1000 a 2000 ±1,2	
Desenho:		Data:	
Responsável:		Revisão: 14/11/2013	
Projeto: MicroScratch		Arquivo: P-5.5.SLDDRW	



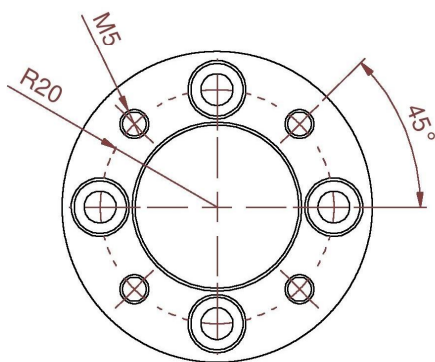
DETALHE V
ESCALA 1:1



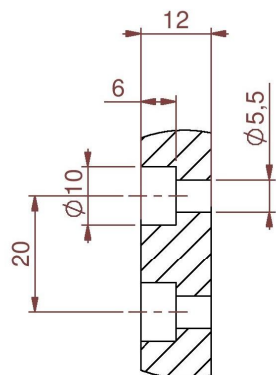
SEÇÃO T-T
ESCALA 1:5



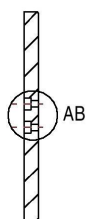
DETALHE Z
ESCALA 1:1



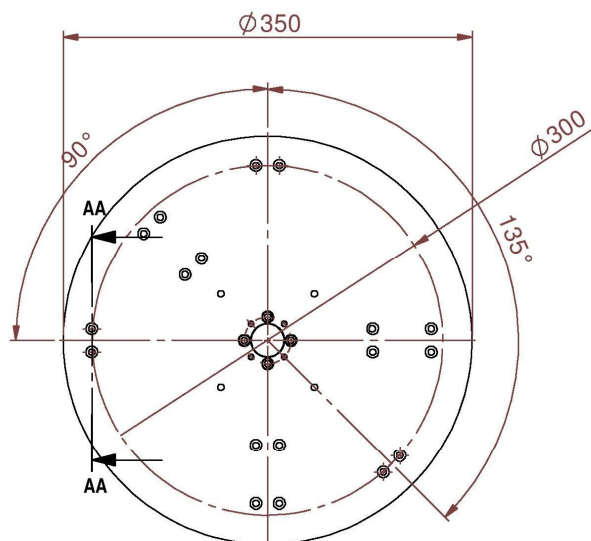
					8		
Quantidade	Nome da Peça				Número da Peça	Material	
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)					Escala: 1:5	
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	120 a 400 ±0,5	400 a 1000 ±0,8		1000 a 2000 ±1,2
	Desenho:				Data:		
	Responsável:				Revisão: 14/11/2013		
	Projeto:			Arquivo:			
	MicroScratch			P-5.6 - 1.SLDDRW			



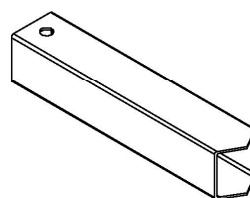
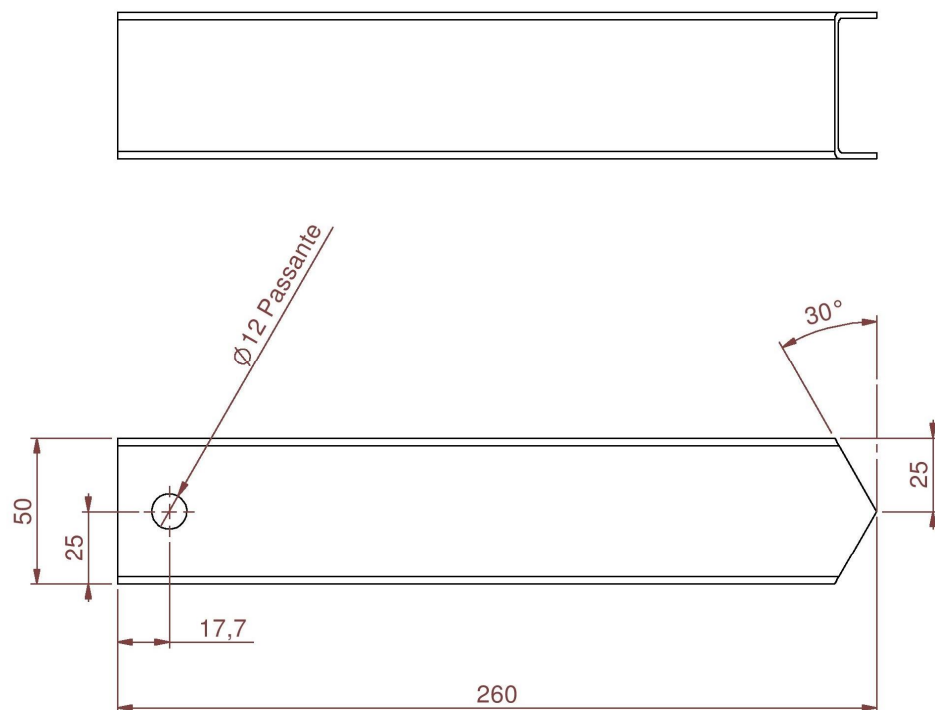
DETALHE AB
ESCALA 1 : 1



SEÇÃO AA-AA
ESCALA 1 : 5



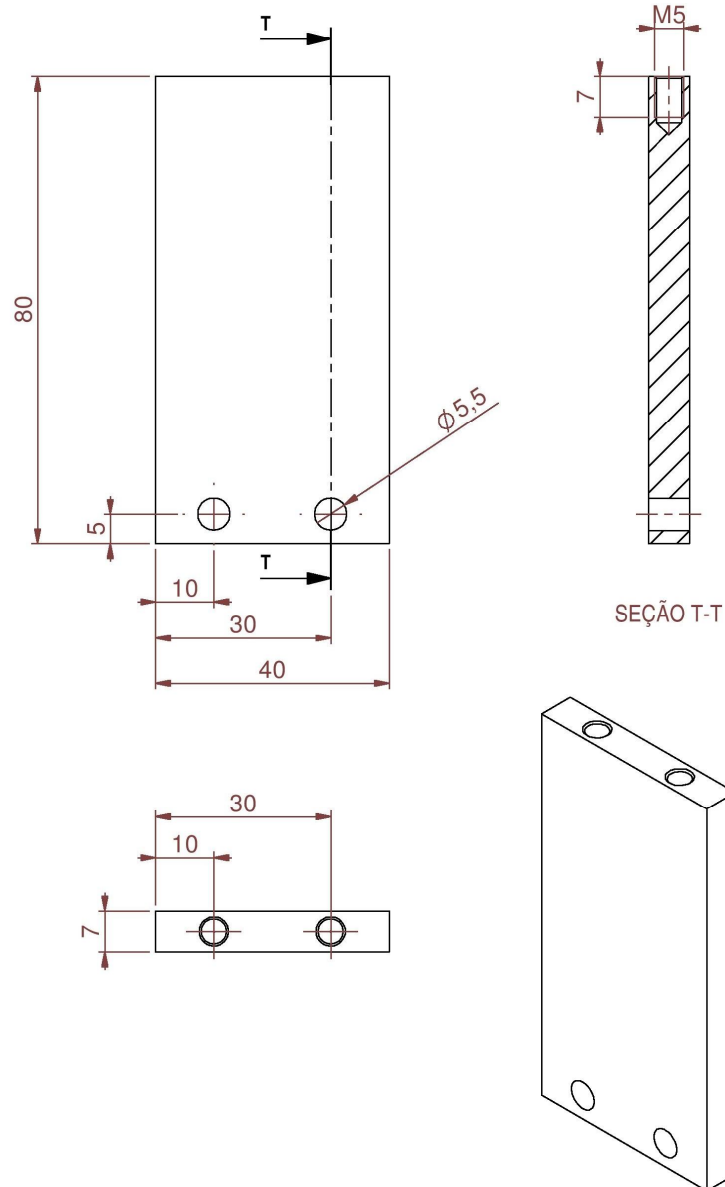
						8			
Quantidade	Nome da Peça					Número da Peça		Material	
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)							Escala: 1:5	
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	120 a 400 ±0,5	400 a 1000 ±0,8	1000 a 2000 ±1,2			
	Desenho:					Data:			
	Responsável:					Revisão: 26/11/2013			
	Projeto: MicroScratch					Arquivo: P-5.6 - 2.SLDDRW			



			1	
Quantidade	Nome da Peça		Número da Peça	Material
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)			Escala: 1:1
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	
			120 a 400 ±0,5	
			400 a 1000 ±0,8	
			1000 a 2000 ±1,2	
	Desenho:	Data:		
	Responsável:	Revisão: 14/11/2013		
	Projeto: MicroScratch	Arquivo: P-8.1.SLDDRW		

					2			
Quantidade	Nome da Peça				Número da Peça		Material	
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)						Escala: 1:1	
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	120 a 400 ±0,5	400 a 1000 ±0,8	1000 a 2000 ±1,2		
	Desenho:				Data:			
	Responsável:				Revisão: 14/11/2013			
	Projeto: MicroScratch				Arquivo: P-8.2.SLDDRW			

Arquivo:
P-9-suporte dos motores X-Y.SLDDRW

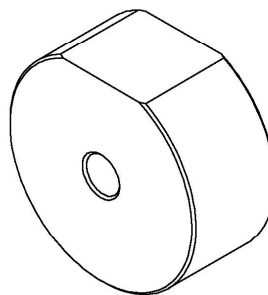


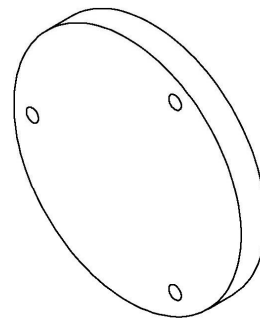
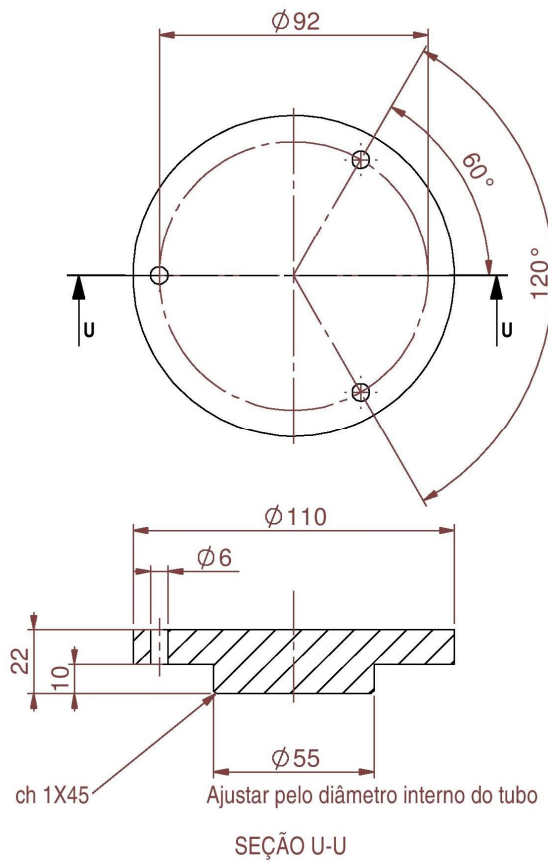
					10	
Quantidade	Nome da Peça				Número da Peça	Material
	DESVIOS MEDIDOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)					Escala: 1:1
	1 a 6 $\pm 0,1$	6 a 30 $\pm 0,2$	30 a 120 $\pm 0,3$	120 a 400 $\pm 0,5$	400 a 1000 $\pm 0,8$	1000 a 2000 $\pm 1,2$
	Desenho:				Data:	
	Responsável:				Revisão: 14/11/2013	
	Projeto: MicroScratch				Arquivo: P-9.1-suporte do motor Z.SLDDRW	



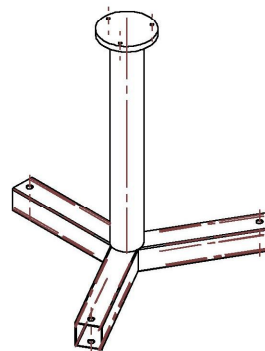
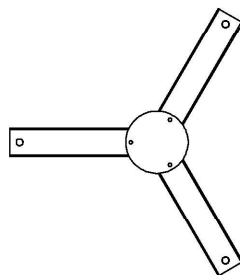
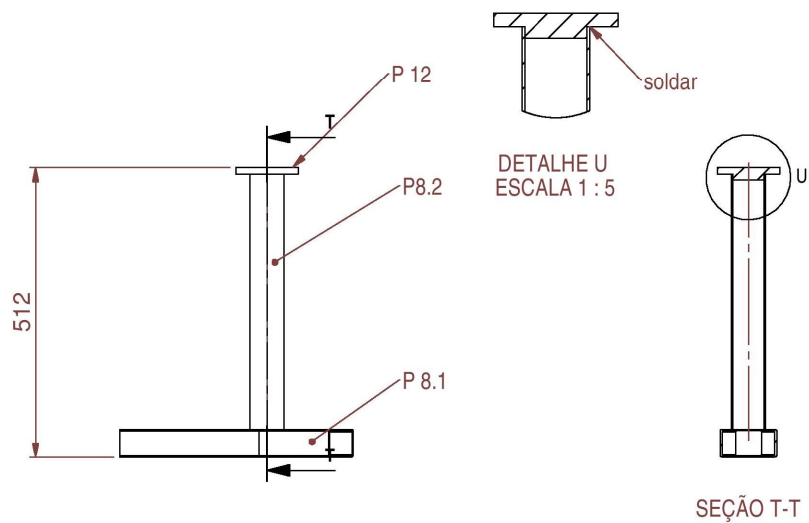
Arquivo: **P-10.1-suporte dos contra peso.SLDDRW**

82



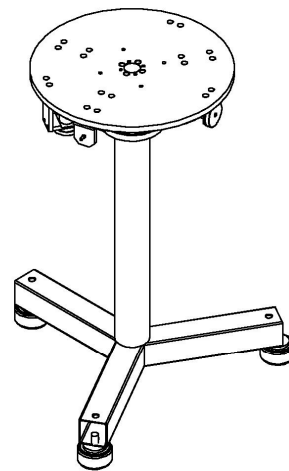
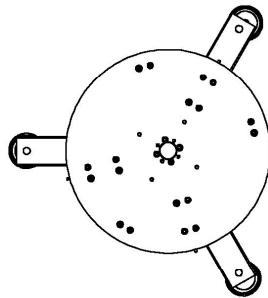
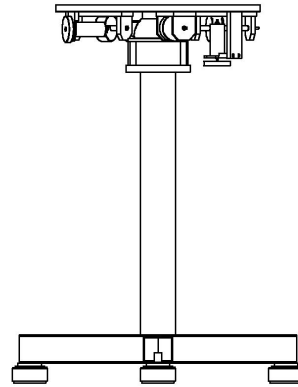
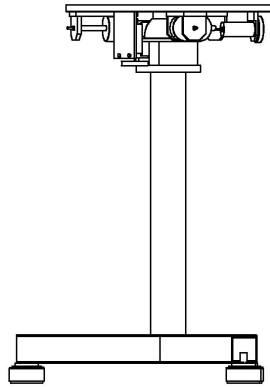


			3	
Quantidade	Nome da Peça		Número da Peça	Material
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)			Escala: 1:1
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3	
			120 a 400 ±0,5	
			400 a 1000 ±0,8	
			1000 a 2000 ±1,2	
	Desenho:	Data:		
	Responsável:	Revisão: 14/11/2013		
	Projeto: MicroScratch	Arquivo: P-12- interface mancal e haste.SLDDRW		



Quantidade	Nome da Peça	Número da Peça	Material
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)		
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3
		120 a 400 ±0,5	400 a 1000 ±0,8
			1000 a 2000 ±1,2
	Desenho:	Data:	
	Responsável:	Revisão: 14/11/2013	
	Projeto: MicroScratch	Arquivo: Montagem da base.SLDDRW	

Escala: 1:1



Quantidade	Nome da Peça	Número da Peça	Material
	DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS (DIN 7168-m)		
	1 a 6 ±0,1	6 a 30 ±0,2	30 a 120 ±0,3
		120 a 400 ±0,5	400 a 1000 ±0,8
			1000 a 2000 ±1,2
	Desenho:	Data:	
	Responsável:	Revisão: 14/11/2013	
	Projeto:	Arquivo:	
		Montagem final.SLDDRW	