

ARTHUR LAZZARINI

**Projeto, fabricação e testes de uma bancada para ensaio de
empuxo de conjunto propulsor de aeronaves rádio controladas**

São Paulo

2014

ARTHUR LAZZARINI

Projeto, fabricação e testes de uma bancada para ensaio de empuxo de conjunto propulsor de aeronaves rádio controladas

Trabalho de formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Luís de
Campos Mariani.

São Paulo
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Lazzarini, Arthur

Projeto, fabricação e testes de uma bancada para ensaio de empuxo de conjunto propulsor de aeronaves rádio controladas. São Paulo: EPUSP, 2014. 62 p. + apêndice

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.SAE Aerodesign 2.Célula de Carga 3.Ensaio em túnel de vento I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica III.t.

AGRADECIMENTOS

À equipe Keep Flying por todos estes anos de aprendizado tanto na área de engenharia quanto na arte do trabalho em equipe. Pelo principal fator motivador deste trabalho e pelo alívio de estresse durante a vida politécnica.

Em especial aos meus colegas e amigos Danilo Vilardi, Eduardo Katsuno, Diego Movio, José Souza e João Zanuto que durante muitas vezes me forneceram apoio moral e técnico sugerindo soluções as quais eu não encontraria sozinho.

À minha namorada e companheira Lais Ito pela ajuda tanto moral, estando ao meu lado em todas as horas, quanto na montagem do sistema elétrico. Sem ela e sem o Carlos Landi provavelmente ainda estaria montando tudo em uma proto-board cheia de fios.

Ao meu amigo, professor e orientador Antonio Luís de Campos Mariani pelo apoio dado, não somente durante este trabalho, mas durante todo o curso. Mostrando que muitas vezes é nas pequenas soluções que se mostra o que é “ENGENHARIA!”.

Aos técnicos Douglas Silva e Laércio Damacena sem os quais este trabalho nunca sairia do papel e tomaria forma.

Ao Professor João Alcino pelo auxílio em parte tão crítica, tendo contribuído decisivamente e pacientemente pelo sucesso deste trabalho.

À minha família, por ter me suportado em horas difíceis e muitas vezes se moldado às minhas necessidades acadêmicas.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo aprimorar o desempenho da equipe Keep Flying na competição SAE Aerodesign através do projeto e fabricação de uma balança para medição de empuxo dos motores utilizados nos protótipos e aeronaves de competição. O parâmetro 'empuxo' é responsável por boa parte da capacidade de carga da aeronave e a tomada com consistência destes dados leva tempo e é bastante trabalhosa. O projeto prevê a automatização de boa parte da coleta de dados, reduzindo o tempo os erros durante o ensaio e aumentando a segurança durante o procedimento, sem comprometer, no entanto, a precisão dos resultados. Além disso o dispositivo foi projetado para ser utilizado no túnel de vento de seção aberta do PET Mecânica fazendo com que os resultados obtidos sejam bem mais fiéis a realidade se comparado a testes estáticos realizados atualmente. O conceito utilizado é o de uma célula cantilever dotada de quatro extensômetros em ponte equilibrada posicionados na região de estrangulamento. O momento fletor realizado pela força de empuxo é captado por esses extensômetros e transmitido para uma central eletrônica baseada em Arduino® que é responsável pela aquisição dos dados do ensaio.

Palavras-chave: Engenharia. Engenharia Mecânica. SAE Aerodesign. Balança Aerodinâmica. Extensômetro. Túnel de vento. Motor em escala. Aquisição de dados.

ABSTRACT

This paper aims to improve the Keep Flying team's performance in the SAE Aerodesign competition through the design and manufacture of a thrust measurement scale for the engines used in the R/C aircraft prototypes. The 'thrust' parameter is responsible for great part of the maximum takeoff weight allowed for the aircraft and the current process to acquire this data is very time consuming and error prone. The project involves the automation of the data collection, reducing time required and enhancing safety during the procedure, without compromising, however, the accuracy of the results. Also, this device is designed to be used in the open section wind tunnel of PET Mechanical making the results obtained much more reliable and closer to real-life situations compared to the static tests performed today. The concept uses a cantilever beam with four strain gages in a balanced bridge positioned in a constriction area. The bending moment caused by the engine's thrust is captured by these gages and transmitted to an Arduino® based data logger which is responsible for the acquisition of the test data.

Keywords: Engineering. Mechanical Engineering. SAE Aerodesign. Aerodynamic Balance. Strain Gauge. Wind Tunnel. RC Engine. Data logging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado do medidor de empuxo em "L"	3
Figura 2 - Foto da balança aerodinâmica completa	4
Figura 3 - OS MAX .61FX	5
Figura 4 - OS MAX .55AX	5
Figura 5 - OS MAX .55AX-BE	5
Figura 6 - Magnum XLS .61A.....	6
Figura 7 - K&B .61 ABC (6170)	6
Figura 8 - Curvas características dos motores OS 61 e OS 55 com hélice 12.25 x 3.75	7
Figura 9 - Gráfico da altitude x massa específica da atmosfera padrão da ICAO	9
Figura 10 - Conceito 1: Dinamômetro	11
Figura 11 - Conceito 2: Célula de flexão	12
Figura 12 - Projeto finalizado em CAD.....	15
Figura 13 - Esboço preliminar das dimensões da célula de carga	17
Figura 14 - Posicionamento dos extensômetros	18
Figura 15 - Resultado de elementos finitos da célula de carga	18
Figura 16 - Furo circular em uma placa sob tração	19
Figura 17 - Posicionamento dos extensômetros na célula com furo	20
Figura 18 - Nova simulação da célula de carga com furo	20
Figura 19 - Ponte completa de extensômetros.....	21
Figura 20 - Célula de carga durante o fresamento da estricção que receberá os extensômetros, a peça em nylon serve para proteger a rosca de fixação de cavacos gerados no processo.....	24
Figura 21 - Célula de carga totalmente usinada rosqueada ao flange de fixação.....	24
Figura 22 - Posicionamento preliminar dos extensômetros.....	25
Figura 23 - Fixação final dos extensômetros com a fiação soldada	25
Figura 24 - Fixação da célula de carga	26
Figura 25 - Flange de fixação da célula de carga acoplado à célula.....	26
Figura 26 - Fixação universal (superior), sempre fixa à célula de carga pelos três furos centrais e fixação específica (inferior) com a furação compatível com cada um dos motores.....	28

Figura 27 - Suporte específicos dos motores em fabricação (fresa)	28
Figura 28 - Suporte universal (superior) e específico (inferior) finalizados.....	28
Figura 29 - Modelo em CAD da haste de fixação do tanque de combustível	29
Figura 30 - Perigos ao operador.....	30
Figura 31 - Montagem da transmissão por chicote	31
Figura 32 - Mesa para suporte do aparato experimental.....	32
Figura 33 - Montagem para o ensaio de vibração 1	34
Figura 34 - Montagem para os ensaios de vibração 3 e 4	34
Figura 35- Sinais obtidos durante o ensaio	35
Figura 36 - FFT do Ensaio Frente-Mesa	36
Figura 37 - FFT do Ensaio Tampo-Suporte.....	36
Figura 38 - FFT do Ensaio Nariz Célula	37
Figura 39 - FFT do Ensaio Nariz-Suporte	37
Figura 40 - Célula de carga com perfil NACA 0012.....	38
Figura 41 - Esquema eletrônico básico	39
Figura 42 - Sensor de pressão atmosférica.....	40
Figura 43 - Sensor de temperatura e umidade.....	40
Figura 44 - Sensor diferencial de pressão.....	40
Figura 45 - Servo SG90	41
Figura 46 – Servo Tester.....	41
Figura 47 - Motor de passo	41
Figura 48 - Potenciômetro	42
Figura 49 - Leitor de cartão SD	42
Figura 50 – Visor LCD.....	42
Figura 51 - Arduino Mega R3	43
Figura 52 - Esquema preliminar do circuito.....	44
Figura 53 - Placa de circuito impresso da bancada.....	45
Figura 54 - Rotina do programa - parte 1	46
Figura 55 - Rotina do programa - parte 2	47
Figura 56 - <i>Layout</i> dos botões de comando	48
Figura 57 - Aparato para calibração	55
Figura 58 - Gráfico dos valores de calibração	56
Figura 59 - Bancada finalizada, execução do ensaio estático.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa de critérios	13
Tabela 2 - Tabela comparativa de critérios normalizada e coeficientes	13
Tabela 3 - Resultados finais	14
Tabela 4 - Resultados das deformações com elementos finitos	18
Tabela 5 - Resultados das novas deformações com elementos finitos.....	21
Tabela 6 - Dados para cálculo do número de Reynolds.....	33
Tabela 7 - Definição dos ensaios de vibração.....	33
Tabela 8 - Etapa 1 da validação numérica	49
Tabela 9 - Etapa 2 da validação numérica	50
Tabela 10 – Estrutura do arquivo "ensaios.csv"	54
Tabela 11 - Dados de calibração da célula de carga	56
Tabela 12 - Arquivo "ensaio.csv"	58
Tabela 13 - Pós processamento do arquivo "ensaio.csv"	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto	1
2	OBJETIVOS	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	Medidor de empuxo em “L”	3
3.2	Balança aerodinâmica	4
3.3	Característica dos conjuntos propulsores a serem testados	5
3.4	Motores	5
3.4.1	OS MAX .61FX	5
3.4.2	OS MAX .55AX	5
3.4.3	OS MAX .55AX-BE	5
3.4.4	Magnum XLS .61A	6
3.4.5	K&B .61 ABC (6170)	6
3.5	Hélices	6
3.5.1	APC 12.25 x 3.75 Sport	6
3.5.2	APC 13 x 4 Sport	6
4	PARÂMETROS E GRANDEZAS MEDIDOS	7
5	PROJETO DA BANCADA	11
5.1	Definição do conceito	11
5.1.1	Conceito 1: Dinamômetro	11
5.1.2	Conceito 2: Célula de flexão	12
5.1.3	Definição dos critérios de análise	12
5.1.4	Atribuição de notas aos conceitos e resultados	13
5.2	Detalhamento do projeto	15
5.2.1	Projeto mecânico	15
5.2.1.1	Célula de carga	16
5.2.1.1.1	Projeto estrutural	16
5.2.1.1.2	Seleção dos extensômetros	17
5.2.1.1.3	Fabricação	23
5.2.1.1.4	Colagem dos extensômetros	24

5.2.1.2	Fixação da célula de carga	25
5.2.1.3	Suporte do motor e acessórios	27
5.2.1.4	Suporte do tanque de combustível.....	29
5.2.1.5	Acomplamento por chicote.....	29
5.2.1.6	Mesa	31
5.2.1.7	Ensaio de vibração.....	32
5.2.1.7.1	Montagem do experimento.....	33
5.2.1.7.2	Análise dos dados obtidos.....	34
5.2.2	Projeto eletrônico.....	39
5.2.2.1	Sensores	39
5.2.2.1.1	Sensor de pressão atmosférica (Barômetro).....	40
5.2.2.1.2	Sensor de temperatura e umidade	40
5.2.2.1.3	Sensor diferencial de pressão (Pitot).....	40
5.2.2.2	Controle.....	40
5.2.2.2.1	Servo	41
5.2.2.2.2	Servo tester	41
5.2.2.2.3	Motor de passo.....	41
5.2.2.2.4	Potenciômetro	42
5.2.2.3	Acessórios.....	42
5.2.2.3.1	Leitor de cartão SD.....	42
5.2.2.3.2	Visor LCD	42
5.2.2.4	Arduino®.....	43
5.2.2.5	Prévia do circuito.....	43
5.2.2.6	Lógica do programa	45
5.2.2.6.1	Validação numérica - Proposição	48
5.2.2.6.2	Validação numérica – Etapa 1.....	49
5.2.2.6.3	Validação numérica – Etapa 2.....	49
5.2.2.6.4	Início, aquisição meteorológica e calibração.	50
5.2.2.6.5	Aquisição dos dados dos extensômetros.	52
6	ENSAIOS COM A BANCADA	54
6.1	Medição de velocidade.....	54
6.2	Calibração	55
6.3	Ensaio preliminares	57

7	CONCLUSÃO	60
8	REFERÊNCIAS.....	62
	Apêndice I – Desenhos de Fabricação.....	63

1 INTRODUÇÃO

Motivado pelas necessidades da equipe Keep Flying de AeroDesign é apresentado o projeto de uma bancada para realização de ensaios, em túnel de vento e estáticos, de conjuntos propulsores com motor e hélice acoplada.

1.1 *Contexto*

A equipe Keep Flying participa, desde 2003, da competição Aerodesign organizada anualmente pela SAE Brasil, representando a Escola Politécnica da USP, e conta com a participação de diversas universidades brasileiras e estrangeiras. O objetivo da competição é projetar, fabricar e testar uma aeronave radiocontrolada cargueira, estável e leve que consiga atingir a maior pontuação possível dentro do regulamento, que é modificado a cada ano.

Apesar das mudanças anuais de regulamento a análise de desempenho da aeronave, tanto em pista (nas fases de pouso e decolagem), quanto em voo, sempre se mostra fundamental. De acordo com a análise de sensibilidade dos parâmetros feita pela equipe no início do ano de 2013, respeitando o regulamento vigente, uma variação de 10% do empuxo do conjunto propulsor representa uma variação de quase 11% na pontuação obtida (EQUIPE KEEP FLYING, 2013), um argumento forte para se investir bastante na medição desse parâmetro.

2 OBJETIVOS

O objetivo central da bancada desenvolvida é obter os parâmetros relacionados ao empuxo e desempenho dos conjuntos motor-hélice utilizados pela equipe, bem como suas curvas características. A bancada deve coletar dados integrados com parâmetros que permitam a reprodução das condições meteorológicas do ensaio e uma melhor avaliação dos dados obtidos.

Adicionalmente a bancada deve permitir uma coleta rápida dos dados. A redução do tempo do ensaio permite à equipe ensaiar um maior número de combinações motor-hélice possíveis num mesmo espaço de tempo. Aumentando as chances de se chegar a uma escolha mais competitiva.

A bancada também deve ser segura para o operador. Para evitar acidentes, como os que já ocorreram durante os ensaios passados, o projeto contempla comandos remotos, evitando a exposição do operador ao risco.

E finalmente a bancada deve permitir uma melhoria contínua de seus processos e métodos. O projeto é executado de tal maneira que pode ser levado adiante pelas próximas gerações do Aerodesign da Escola Politécnica da USP.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente para execução do projeto foram pesquisados dispositivos medidores de força (ou de momento) já fabricados pela equipe. As duas principais referências foram um medidor de empuxo em “L” e uma balança aerodinâmica. Além disso também foram consultadas referências que permitem analisar como é feita a medição de forças e quais as alternativas para tal como apresentado em (TROPEA et al, 2007) e (TIMOSHENKO, 1933). Ao final as características dos conjuntos propulsores foram avaliadas.

3.1 Medidor de empuxo em “L”

O “L” é uma maneira bastante simples de se medir o empuxo gerado pelo conjunto propulsor. Seu funcionamento depende basicamente de dois componentes: uma balança convencional com capacidade para efetuar medições de 1 a 5 kg e uma estrutura em “L” rígida com um ponto de apoio e uma articulação. A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do equipamento.

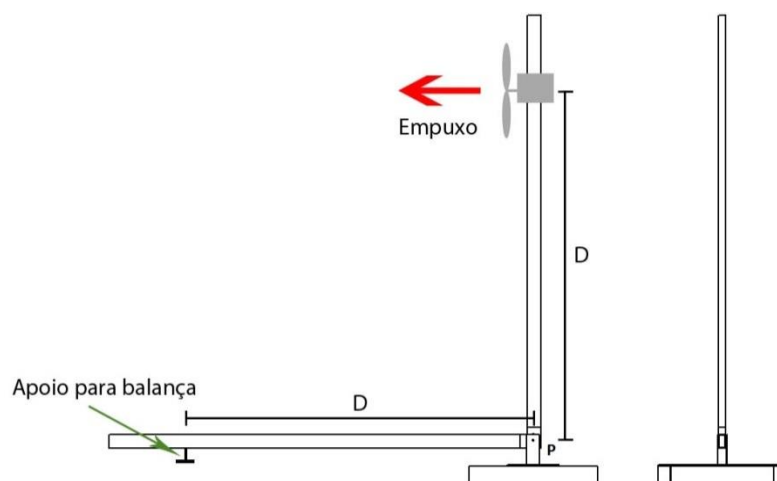


Figura 1 - Esquema simplificado do medidor de empuxo em "L"

O funcionamento do “L” é bastante simples. A junta “P” é projetada para não resistir a quaisquer momentos nela aplicados de tal forma que toda a força de empuxo seja transmitida integralmente até o apoio e medida pela balança. Admite-se também que a estrutura é suficientemente rígida para que eventuais deformações não interfiram na medição. Ao aplicar o equilíbrio de momentos na estrutura em “L” obtém-se:

$$M_{apoio} + M_{junta P} = M_{empuxo}$$

$$M_{apoio} = M_{empuxo} \text{ com } M_{junta P} = 0$$

$$F_{apoio} \times D = F_{empuxo} \times D$$

$$F_{apoio} = F_{empuxo}$$

3.2 Balança aerodinâmica

A balança aerodinâmica apresenta um funcionamento bem mais complexo do que o esperado para esse projeto. Porém seu método construtivo e as soluções encontradas durante o projeto podem ser aplicados. A balança, projetada pela equipe em conjunto com o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e o Laboratório de Instrumentação em Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, consiste num dispositivo de medição de seis graus de liberdade (6DOF) possibilitando a obtenção de três forças e três momentos em um modelo de aeronave durante um ensaio em túnel de vento. A Figura 2 mostra a balança finalizada.



Figura 2 - Foto da balança aerodinâmica completa

Seu funcionamento é baseado na deformação elástica do corpo metálico que é medido através de extensômetros (*Strain Gauges*). A diferença de potencial de um ou mais sensores é atribuída à magnitude de uma força ou momento ao se fazer a calibração. Dessa forma é possível realizar medições combinadas que possibilitam encontrar as reações aerodinâmicas em uma aeronave. (MARIANI; PADOVESI, 2011)

3.3 Característica dos conjuntos propulsores a serem testados

Inicialmente é feita uma pré-seleção utilizando apenas os conjuntos que se demonstraram mais promissores ao longo dos anos. São 5 motores e 2 hélices, totalizando 10 combinações possíveis. Com a bancada construída será possível testar uma infinidade de combinações, sendo limitado apenas pelo tempo disponível para ensaio.

3.4 Motores

3.4.1 OS MAX .61FX



Figura 3 - OS MAX .61FX

- Cilindrada: 0,607 pol³.
- Massa: 706g (c/ escapamento).
- Faixa de operação: 2.000 a 17.000 rpm.
- Potência: 1,9 hp / 16.000 rpm.
- Combustível: pelo menos 18% óleo e de 5 a 20% nitrometano.

3.4.2 OS MAX .55AX



Figura 4 - OS MAX .55AX

- Cilindrada: 0,545 pol³.
- Massa: 525g (c/ escapamento).
- Faixa de operação: 2.000 a 17.000 rpm.
- Potência: 1,68 hp / 16.000 rpm.
- Combustível: pelo menos 18% e de óleo, 5 a 20% nitrometano.

3.4.3 OS MAX .55AX-BE



Figura 5 - OS MAX .55AX-BE

- Cilindrada: 0, 545 pol³.
- Massa: 527g (c/ escapamento).
- Faixa de operação: 2.000 a 12.000 rpm
- Potência: 0,95 hp / 10.000 rpm

- Combustível: O.S. Bioethanol.

3.4.4 *Magnum XLS .61A*



Figura 6 - Magnum XLS .61A

- Cilindrada: 0,607 pol³.
- Massa: 638g (c/ escapamento).
- Faixa de RPM: 2.000 a 16.000 rpm.
- Potência: Não informada.
- Combustível: pelo menos 18% óleo e 15% nitrometano.

3.4.5 *K&B .61 ABC (6170)*

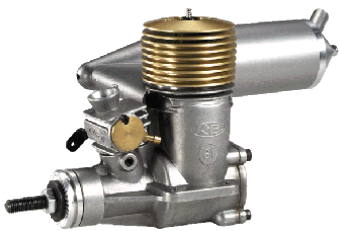


Figura 7 - K&B .61 ABC (6170)

- Cilindrada: 0,610 pol³.
- Massa: 509g (c/ escapamento).
- Faixa de RPM: 2.200 a 15.000 rpm.
- Potência: 1.8 hp / 15.000 rpm.
- Combustível: pelo menos 18% óleo e de 5 a 15% nitrometano.

3.5 Hélices

3.5.1 *APC 12.25 x 3.75 Sport*



- Diâmetro externo: 12,25 in
- Passo: 3,75 in
- Massa: 43g

3.5.2 *APC 13 x 4 Sport*



- Diâmetro externo: 13 in
- Passo: 4 in
- Massa: 50g

4 PARÂMETROS E GRANDEZAS MEDIDOS

O objetivo deste projeto é levantar a curva característica de desempenho do motor, semelhante à mostrada na Figura 8, retirada de (EQUIPE KEEP FLYING, 2013).

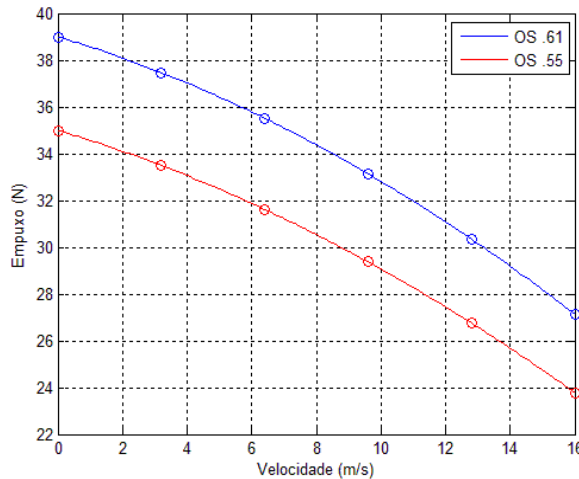


Figura 8 - Curvas características dos motores OS 61 e OS 55 com hélice 12.25 x 3.75

Dessa forma deve-se medir, a princípio:

- Força de empuxo (N ou kgf);
- Velocidade do escoamento (m/s).

Porém estes dados são característicos de apenas uma condição climática. Os ensaios de empuxo são realizados entre maio e junho na Escola Politécnica enquanto a competição é realizada no final de outubro, em São José dos Campos. Portanto é comum ensaiar o motor a 18°C em São Paulo e observar um rendimento bastante diferente a 30°C em São José dos Campos, durante a competição.

É necessário, portanto, obter um dado que seja capaz de extrapolar a curva obtida em laboratório para o caso real. O dado em questão é a altitude-densidade, que consiste na obtenção de um valor de densidade do ar local e a sua conversão em altitude de acordo com a atmosfera padrão da ICAO (ICAO, 1993). A densidade do ar local pode ser calculada da seguinte maneira (MURRAY, 1967):

$$\rho_{ar \text{ úmido}} = \frac{p_{dry} \cdot \bar{M}_d + p_{vap} \cdot \bar{M}_v}{\bar{R} \cdot T}$$

$$p_{vap} = \phi \cdot p_{sat}$$

$$p_{sat} = 610,78 \cdot e^{17,2693882 \cdot (T-273,16)/(T-35,86)}$$

$$p_{dry} = p_{atm} - p_{vap}$$

Onde:

- $\rho_{ar \text{ úmido}}$: Densidade do ar úmido, dada em kg/m^3 .
- p_{dry} : Pressão parcial do ar seco, dada em Pa (pascals).
- \overline{M}_d : Massa molar do ar seco ($28,97 \text{ kg/kmol}$).
- p_{vap} : Pressão de vapor da água, dada em Pa (pascals).
- \overline{M}_v : Massa molar do vapor de água ($18,015 \text{ kg/kmol}$).
- \overline{R} : Constante universal dos gases ($8314,51 \text{ J/kmol} \cdot K$).
- T : Temperatura de bulbo seco local, dada em K (kelvin).
- ϕ : Umidade relativa do ar, dada em %.
- p_{sat} : Pressão de saturação do vapor de água, dada em Pa (pascals).
- p_{atm} : Pressão atmosférica local, dada em Pa (pascals).

Sendo necessários, portanto, obter as seguintes grandezas através de medição:

- p_{atm} : Pressão atmosférica local
- T : Temperatura de bulbo seco local, dada em K (kelvin).
- ϕ : Umidade relativa do ar, dada em %.

Para efeito de comparação com a atmosfera padrão calcula-se a densidade do ar utilizando as fórmulas:

$$\rho_{ICAO} = \frac{p_{ICAO}}{1000 \cdot R \cdot T_{ICAO}}$$

$$p_{ICAO} = p_b \cdot \left(1 + \frac{\beta}{T_b} \cdot (H - H_b) \right)^{\frac{-g_0}{\beta \cdot R}}$$

$$T_{ICAO} = T_b + \beta \cdot (H - H_b)$$

Onde:

- p_{ICAO} : Pressão padrão do ar na atmosfera da ICAO.
- p_b : Pressão do limite inferior da camada estudada ($101,325 \cdot 10^3 \text{ Pa}$).
- T_b : Temperatura do limite inferior da camada estudada ($288,15 \text{ K}$).
- H : Altitude geopotencial, dada em km (quilômetros).
- H_b : Altitude geopotencial do limite inferior da camada estudada (0 km).

- g_0 : Aceleração da gravidade ($9,80665 \text{ m/s}^2$).
- β : Gradiente de temperatura ($-6,50 \text{ K/km}$).
- R : Constante dos gases para o ar seco ($0,287053 \text{ kJ/kmol.K}$).
- ρ_{ICAO} : Densidade do ar padrão, dada em kg/m^3 .
- T_{ICAO} : Temperatura do ar padrão, dada em K (kelvin).

Se fizermos $\rho_{ICAO} = \rho_{ar \text{ úmido}}$ obteremos a altitude geopotencial equivalente H em km na atmosfera da ICAO. Porém a solução não é direta por se tratar de uma equação não-linear.

Para simplificar a solução basta notar que o valor de ρ_{ICAO} varia quadraticamente (para uma melhor aproximação) com H para altitudes pequenas. A Figura 9 mostra a plotagem dos valores de 0 a 2 km de altitude geopotencial.

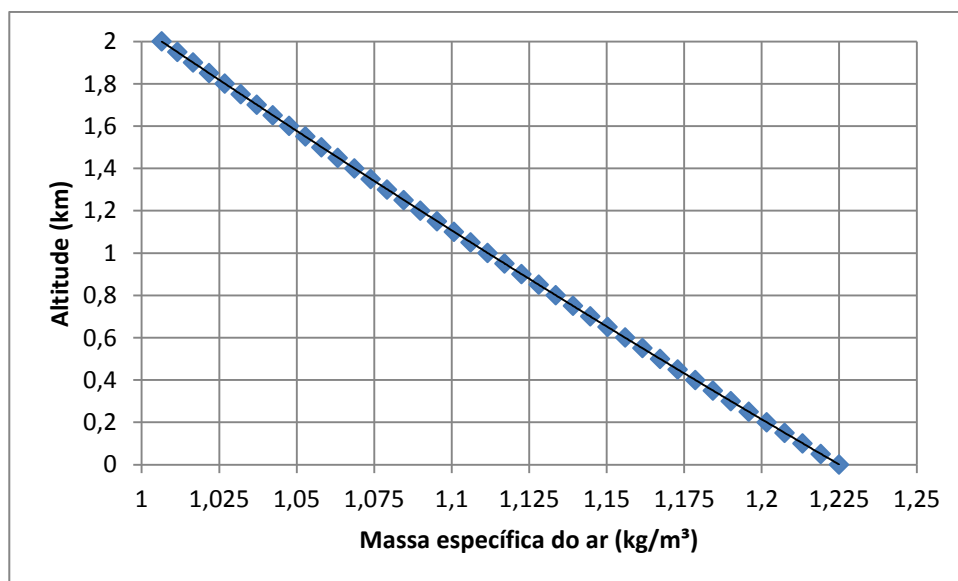


Figura 9 - Gráfico da altitude x massa específica da atmosfera padrão da ICAO

O polinômio de ordem 2 que rege a equação é:

$$H = 3,1449 \cdot \rho_{ICAO}^2 - 16,163 \cdot \rho_{ICAO} + 15,082$$

Com coeficiente de correlação $R \cong 1$. Lembrando que $\rho_{ICAO} = \rho_{ar \text{ úmido}}$. Para obter a altitude-densidade basta multiplicar por 1000 valor de H obtido:

$$AD = 1000.H [m]$$

Para uma sequência computacional programa-se:

- Leitura dos dados de medição: p_{atm}, T, ϕ ;
- Calcula-se p_{sat} ;
- Calcula-se p_{vap} ;
- Calcula-se p_{dry} ;
- Calcula-se $\rho_{ar\ úmido}$;
- Calcula-se H ;
- Calcula-se AD convertendo H para metros;

5 PROJETO DA BANCADA

5.1 Definição do conceito

Para esta etapa foi utilizado o método *Analytic Hierarchy Process (AHP)* que se trata de um processo bastante utilizado na metodologia de projeto e serve bem à necessidade da escolha de um conceito (SAATY, 1980).

Dois conceitos foram propostos para a bancada. Cada um deles tem a capacidade de atender às necessidades do projeto. Para simplificar atribuiremos um número e um breve título a cada um dos conceitos.

5.1.1 Conceito 1: Dinamômetro

O conceito do dinamômetro é formado por duas grandes peças. Uma base fixa “1” e um suporte móvel “3”. Guias lineares “2” são instaladas na base fixa, o que permite que o suporte móvel se desloque limitado pela deflexão de uma mola de alta rigidez “4” e de uma célula de carga comercial tipo “S” de tração “5”. O motor é fixado na mesa superior “6” que é soldada ao suporte móvel. A medição do empuxo do motor é feita com esforços de tração medidos através do deslocamento do suporte móvel e captados pela célula de carga. O esquema deste conceito pode ser visto na Figura 10

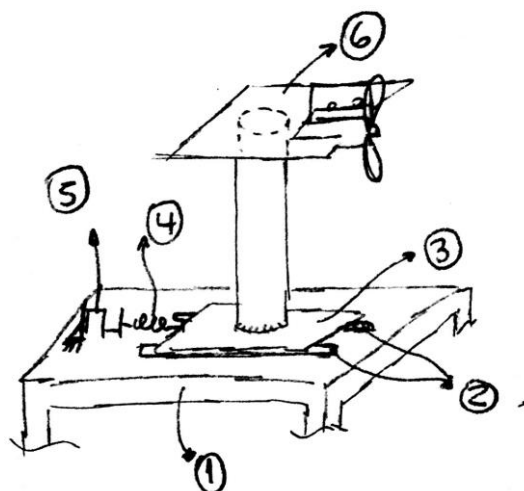


Figura 10 - Conceito 1: Dinamômetro

5.1.2 Conceito 2: Célula de flexão

O conceito da célula de flexão também é formado por duas grandes peças. Uma base fixa “1” e uma célula de carga do tipo cantilever “3” acoplada a uma mesa superior “4”. A parte inferior da célula de carga é soldada à base fixa e a parte superior é fixada à mesa. Quatro extensômetros “2” são posicionados nas faces do rebaixo da célula conforme a Figura 11, dois trabalhando em tração e dois em compressão ligados em ponte. O empuxo do conjunto motor-hélice é medido através dos esforços de flexão na célula de carga.

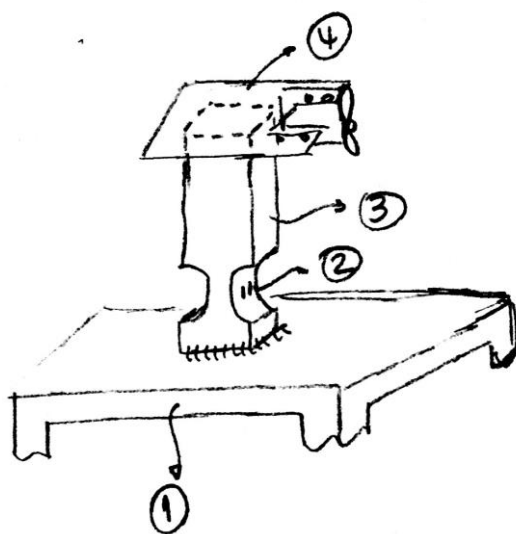


Figura 11 - Conceito 2: Célula de flexão

5.1.3 Definição dos critérios de análise

Cada uma das soluções foi avaliada de acordo com os seguintes critérios:

- Custo;
- Robustez;
- Complexidade;
- Segurança.

Tendo estes critérios definidos e utilizando o método proposto obtemos as tabelas comparativas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 - Tabela comparativa de critérios

Critérios	<i>Custo</i>	<i>Robustez</i>	<i>Complex.</i>	<i>Segurança</i>
<i>Custo</i>	1,00	5,00	4,00	0,33
<i>Robustez</i>	0,20	1,00	3,00	0,20
<i>Complex.</i>	0,25	0,33	1,00	0,11
<i>Segurança</i>	3,00	5,00	9,00	1,00
Total	4,45	11,33	17,00	1,64

Tabela 2 - Tabela comparativa de critérios normalizada e coeficientes

Critérios Norm.	<i>Custo</i>	<i>Robustez</i>	<i>Complex.</i>	<i>Segurança</i>	Total	Média	Medida de consistência
<i>Custo</i>	0,22	0,44	0,24	0,20	1,10	0,28	4,40
<i>Robustez</i>	0,04	0,09	0,18	0,12	0,43	0,11	4,03
<i>Complex.</i>	0,06	0,03	0,06	0,07	0,21	0,05	4,16
<i>Segurança</i>	0,67	0,44	0,53	0,61	2,25	0,56	4,27
Total	1,00	1,00	1,00	1,00		CI=	0,09
						RI=	0,90
						CR=	0,10

Segundo (SAATY, 1980) como o $CR \leq 0,10$ a análise dos critérios se encontra suficientemente consistente.

5.1.4 Atribuição de notas aos conceitos e resultados

A cada um dos conceitos são dadas quatro notas relativas aos quatro critérios anteriormente citados. As notas serão dadas conforme:

- **Custo:** Quanto maior a nota nesse critério menor é o custo de fabricação da solução.
- **Robustez:** Quanto maior a nota neste critério mais simples é a montagem. Ou seja, o conjunto é composto por menos peças.
- **Complexidade:** Quanto menor a nota neste critério mais complexo é o projeto. Ou seja, seu desenvolvimento consiste em mais etapas ou subconjuntos não comerciais (comprados prontos).
- **Segurança:** Quanto maior a nota neste critério mais seguro para o operador é a solução proposta.

Os valores possíveis para nota são os inteiros de 0 a 4.

A Tabela 3 apresenta os resultados:

Tabela 3 - Resultados finais

Critério	Conceito 1 Dinamômetro		Conceito 2 Célula de flexão	
	Nota	Peso	Nota	Peso
<i>Custo</i>	2,00	0,28	3,00	0,28
<i>Robustez</i>	2,00	0,11	3,00	0,11
<i>Complex.</i>	3,00	0,05	1,00	0,05
<i>Segurança</i>	2,00	0,56	4,00	0,56
	Total	2,05	Total	3,46

Uma breve justificativa de cada nota segue:

- **Custo:** O grande diferencial de custo do conceito 1 em relação ao 2 são as guias lineares que encarecem bastante o projeto.
- **Robustez:** O conceito 2 apresenta uma montagem mais simples sem a necessidade de muitos ajustes como é o caso do posicionamento das guias e o alinhamento da mola e da célula de carga no conceito 1.
- **Complexidade:** O conceito 2 se mostra mais complexo já que requer o projeto da célula de carga customizado para o uso que será feito, implicando em um maior tempo de projeto.
- **Segurança:** O conceito 1, por apresentar partes móveis e junções não rígidas (como é o caso da mola), pode ser considerado menos seguro que o conceito 2.

Dessa forma, de acordo com a nota obtida, o conceito 2, da célula de flexão, foi o escolhido, sendo então utilizado nas demais etapas do projeto.

5.2 Detalhamento do projeto

Com o conceito escolhido parte-se para o detalhamento do projeto que consistirá basicamente de duas etapas. O projeto mecânico, que é composto pela célula de carga cantilever, pela mesa e pelos suportes para o conjunto propulsor e o projeto eletrônico, que consiste na seleção da instrumentação e definição do método operacional da bancada.

5.2.1 Projeto mecânico

Todos os componentes do projeto mecânico possuem desenho técnico apresentado no Apêndice I, em seguida serão detalhados os mais importantes com suas respectivas hipóteses. A Figura 12 mostra o conjunto finalizado em CAD para uma melhor referência sobre a localização de cada componente.

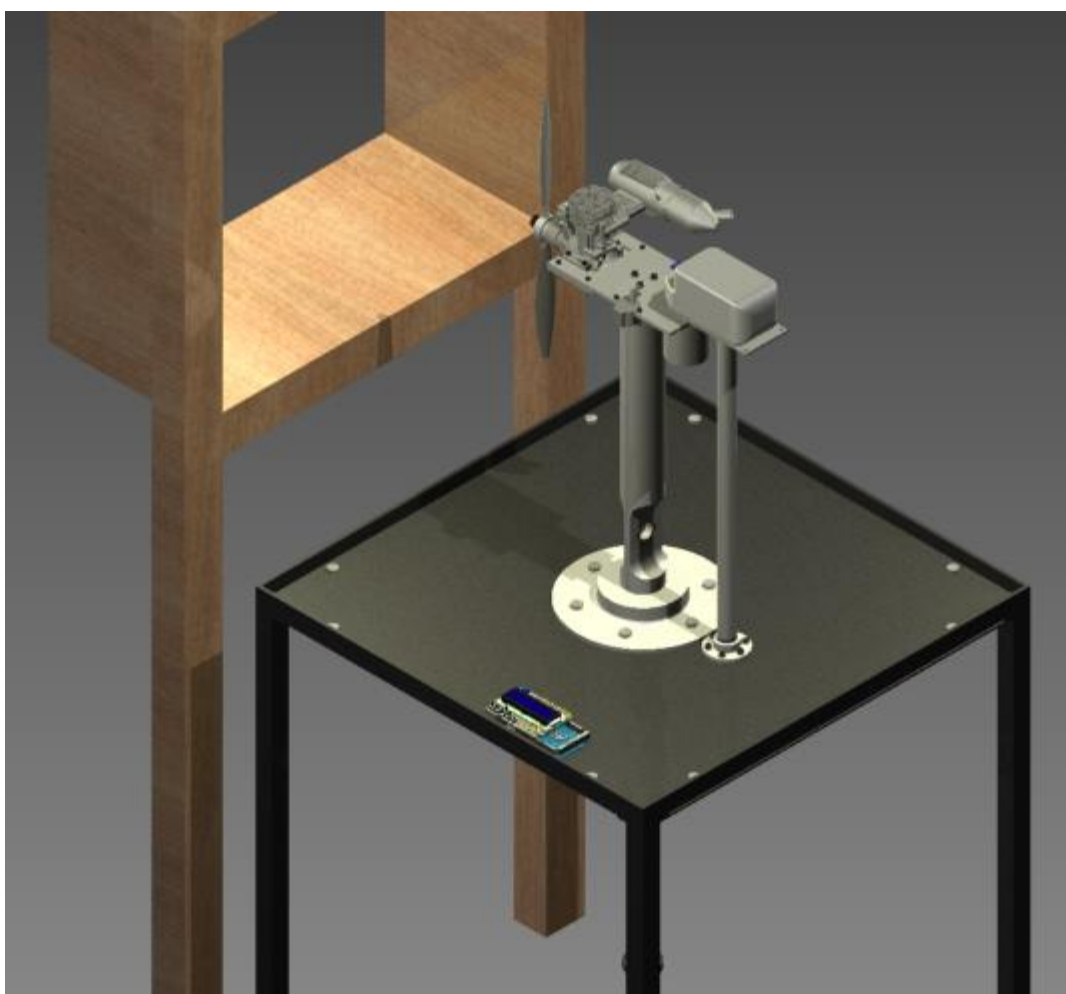


Figura 12 - Projeto finalizado em CAD.

5.2.1.1 Célula de carga

A célula de carga é o principal elemento da bancada, pois permitirá a transmissão dos esforços de empuxo para os extensômetros.

5.2.1.1.1 Projeto estrutural

Com o conceito da célula de carga do tipo cantilever definido usou-se a experiência adquirida em (MARIANI; PADOVESI, 2011) e tomou-se o material como sendo alumínio aeronáutico (Al 7075-T651) cujas propriedades podem ser encontradas em (VINER BRASIL TECNOLOGIA, 2013), fornecedor do material.

Conforme definido no conceito, para efetuar a medição da força de empuxo, são necessários quatro extensômetros, localizados numa região de estrangulamento da seção, dois atuando sob compressão, e dois sob tração.

O conceito mostra uma célula com seção retangular. No entanto, como seu corpo ficará imerso no escoamento é interessante que ele não interfira no mesmo, portanto foi adotada uma célula de formato cilíndrico, apenas com estrangulamento de seção retangular, a seção cilíndrica foi arbitrada como sendo 50 mm, suficiente para garantir a integridade estrutural, porém perturbando pouco o escoamento.

O comprimento da balança foi definido de tal forma que a mesa ficasse abaixo do bocal de saída do túnel de vento e o motor sobre a célula fosse posicionado no centro do escoamento. Dessa forma a altura conveniente encontrada foi de, pelo menos, 400 mm.

A região de medição foi definida na parte inferior da balança e deveria atender a dois critérios. Deveria ter a deformação adequada para captação com os extensômetros e, ao mesmo tempo, não ser delgada a tal ponto de se tornar suscetível à deformações plásticas durante a montagem e desmontagem do conjunto propulsor. Foi escolhida então uma espessura de 10 mm na região de medição, sua posição longitudinal foi arbitrada e os resultados analisados posteriormente.

Um esboço da célula de carga com as dimensões preliminares é mostrado na Figura 13.

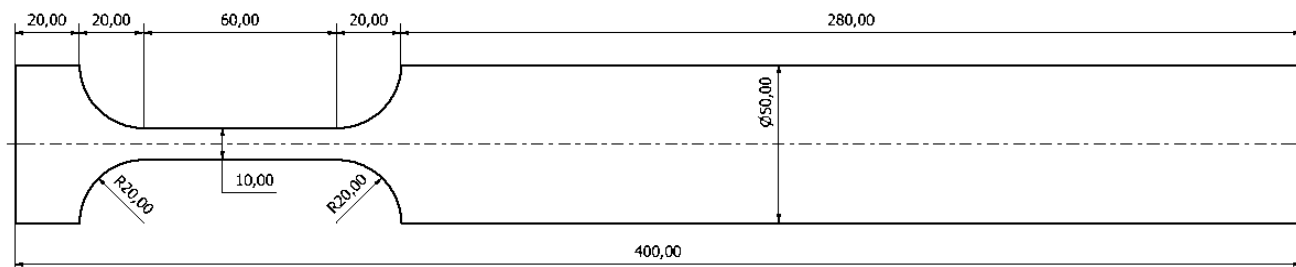


Figura 13 - Esboço preliminar das dimensões da célula de carga

5.2.1.1.2 Seleção dos extensômetros

Para a seleção dos extensômetros foi calculada a deformação na região de medição através da teoria elástica clássica com um modelo de viga engastada. O resultado foi posteriormente analisado em elementos finitos para considerar as concentrações de tensão causadas pelo formato da estrutura.

Nas simulações de elementos finitos foram consideradas as forças de empuxo de 1,0 kgf e 6,0 kgf (em simulações separadas). Além disso foram levadas em conta: a massa da própria célula, em torno de 2,2 kg e a massa do aparato sobre ela (toda a instalação do motor) totalizando aproximadamente 1,0 kg. Os valores das forças foram definidos baseando-se no envelope de medição, que se situa entre 2,0 kgf e 4,0 kgf.

Como condição de contorno foi imposto um engaste ideal na face circular inferior da célula de carga.

Os extensômetros foram distribuídos, em ambos os lados, uniformemente na face de medição como mostra a Figura 14.

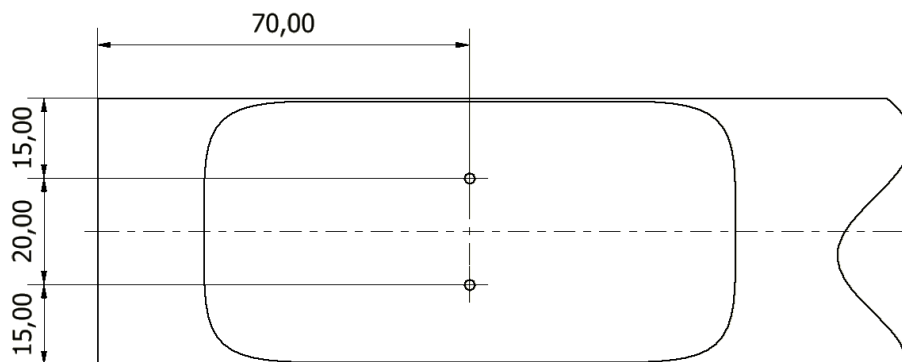


Figura 14 - Posicionamento dos extensômetros

A Figura 15 mostra os resultados da simulação para uma força de 6,0 kgf, levando em conta, portanto, um coeficiente de segurança de 1,5. Os balões indicam as deformações nas posições dos 4 extensômetros.

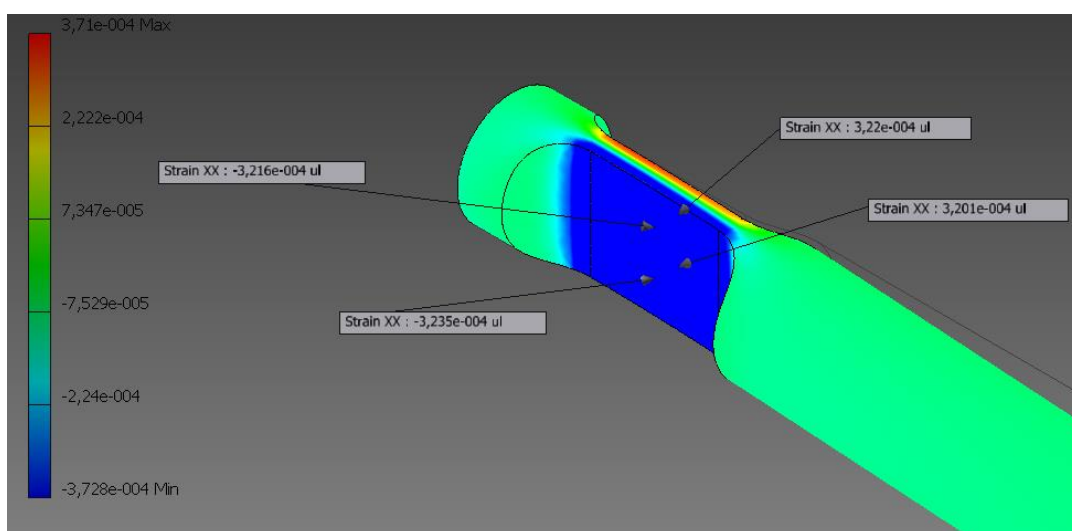


Figura 15 - Resultado de elementos finitos da célula de carga

A Tabela 4 foi gerada com as 8 deformações nos dois casos, seus valores médios (dado que os de compressão e tração são muito próximos) foram usados para prosseguir com os cálculos:

Tabela 4 - Resultados das deformações com elementos finitos

Empuxo	Máximo (6 kgf)	Mínimo (1 kgf)
Deformação dos extensômetros (microstrain, $10^{-6} \epsilon$)		
1 (+e)	320,1	52,71
2 (-e)	323,5	54,52
3 (+e)	322,0	53,06
4 (-e)	321,6	54,2
Média	321,8	53,62

Analisando a Tabela 4 é possível notar que as deformações são muito pequenas se considerarmos que o escoamento do alumínio ocorre em torno de 1200 *microstrain*. Geralmente para extensometria são usados valores máximos de deformação em torno de 900 *microstrain* com este material.

Dessa forma foi proposta uma alteração na região de estrangulamento que aumentasse a deformação nos extensômetros. A primeira opção seria diminuir a espessura da seção de medição (10 mm), no entanto isso fragilizaria a peça e a tornaria mais suscetível a problemas com vibração já que reduziria sua frequência natural.

A solução adotada então foi tirar vantagem da concentração de tensão na extremidade de um furo. Segundo (YOUNG; BUDYNAS, 2002) a tensão obtida na extremidade de um furo em uma chapa sob tração, considerando a Figura 16 é dada por:

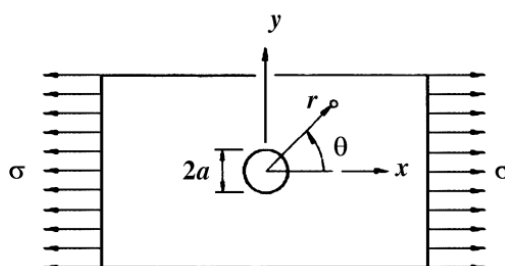


Figura 16 - Furo circular em uma placa sob tração

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma}{2} \left[1 + \frac{a^2}{r^2} - \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

Pode-se observar que essa função atinge valor máximo quando $r = a$ e $\theta = \pm 90^\circ$, neste caso $\sigma_{\theta} = 3\sigma$.

Admitindo que exista esse comportamento para as superfícies em tração e compressão no estrangulamento da célula de carga foi refeita a simulação em elementos finitos com um furo posicionado no centro da face de estrangulamento, como mostra a Figura 17.

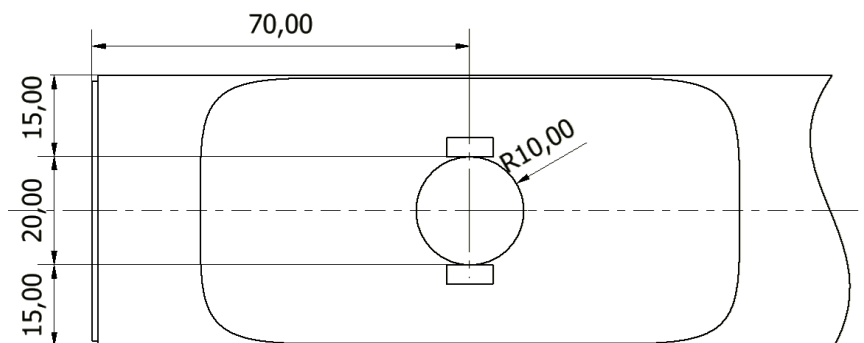


Figura 17 - Posicionamento dos extensômetros na célula com furo

No entanto, como se pode notar pela figura, os extensômetros não são pontuais, logo eles não conseguirão de fato estar apenas na região onde a tensão é multiplicada por três e sim distribuídos ao longo da lateral do furo.

A simulação em elementos finitos mostrada na Figura 18 mostra as novas deformações na região dos extensômetros para a força máxima (6 kgf).

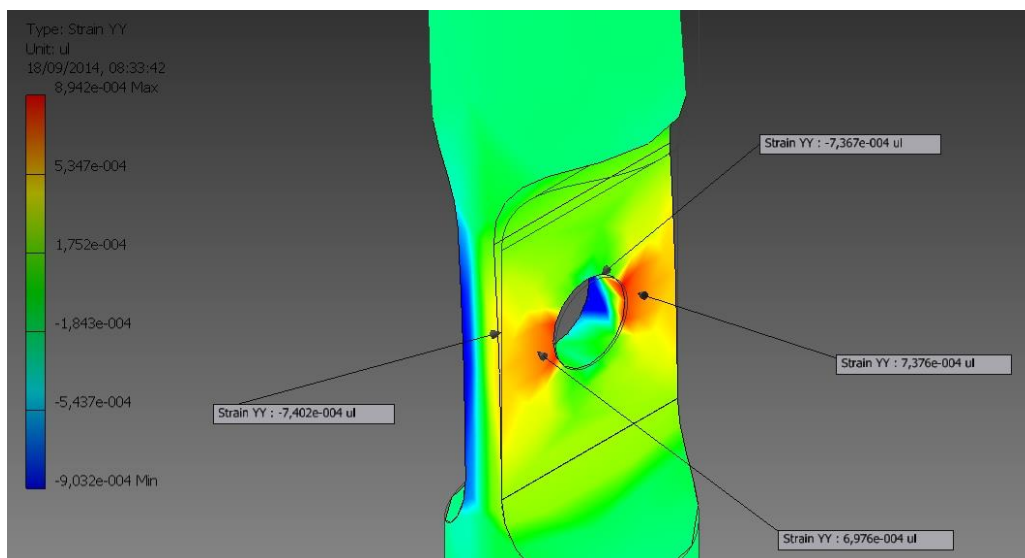


Figura 18 - Nova simulação da célula de carga com furo

A Tabela 5 mostra os novos valores de deformação.

Tabela 5 - Resultados das novas deformações com elementos finitos

Empuxo	Máximo (6 kgf)	Mínimo (1 kgf)
Deformação dos extensômetros (microstrain, $10^{-6} \epsilon$)		
1 (+e)	737,6	121,46
2 (-e)	736,7	124,16
3 (+e)	697,6	114,95
4 (-e)	704,2	118,68
Média	719,0	119,81

Pode-se notar que o ganho na magnitude da deformação foi de 2,23 vezes. Isso devido ao fato já explicado anteriormente do extensômetro ser um corpo com dimensões e não pontual. Mesmo assim o ganho em deformação justifica essa alteração no projeto. Vale ressaltar que a deformação máxima na extremidade do furo foi de 894,2 *microstrain*, muito próximo dos 900 *microstrain* recomendados.

Para relacionar a deformação com a tensão nos extensômetros, utilizaremos (HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK, 2013). Os extensômetros estarão conectados formando uma ponte completa, como na Figura 19:

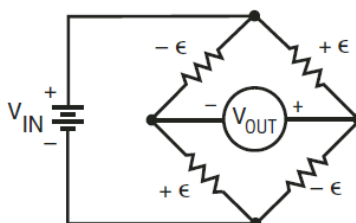


Figura 19 - Ponte completa de extensômetros

Dispostos nessa forma vale a seguinte relação:

$$\epsilon = -\frac{V_r}{GF}$$

Onde GF é o chamado *gage-factor* que tem valor 2,0 para a maioria dos extensômetros. Para relacionar as tensões de entrada e de saída temos:

$$V_r = \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)_{strained} - \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right)_{unstrained}$$

A medição está concentrada em uma placa *Arduino*®. A tensão fornecida por essa placa que irá alimentar a célula de carga é de 5 V. Para prosseguir com os cálculos escolheu-se extensômetros modelo LY13-3/350 da HBM por possuírem tensão de entrada máxima de 7 V e especificações compatíveis com as deformações encontradas.

Utilizando a entrada do *Arduino*® o valor V_{in} será fixado em 5 V. Considerando que a ponte está em equilíbrio quando a estrutura não está deformada vale:

$$\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)_{unstrained} = 0 V$$

Daí os valores de V_{out} tornam-se:

$$V_{out_{6kgf}} = 7,190 mV \text{ e } V_{out_{1kgf}} = 1,198 mV$$

Para captar esses valores com a entrada analógica do *Arduino*® deve-se ter tensões próximas de 5 V, necessitando portanto de um circuito de amplificação.

Para tal foi escolhido o amplificador de instrumentação INA125P da *Texas Instrument* (TEXAS INSTRUMENT, 2013).

Usando um resistor de 100 Ω (Série E12) obtém-se um ganho de aproximadamente 604 vezes com o amplificador. Dessa forma:

$$V_{out_{6kgf}} = 4,34 V \text{ e } V_{out_{1kgf}} = 0,72 V$$

Considerando que o *Arduino*® possui em sua entrada analógica 1024 divisões entre 0 e 5 V (0 a 1023) os respectivos valores digitais destas tensões elétricas são:

$$(Valor)_{6kgf} = 889 \text{ e } (Valor)_{1kgf} = 148$$

Como a variação entre 1,0 kgf e 6,0 kgf está compreendida entre 741 divisões digitais de entrada da porta analógica do *Arduino®* a resolução da instrumentação será obtida de acordo com a equação:

$$Resolução = \frac{5 \text{ kgf}}{Var_{valores}} = 6,7 \text{ gf}$$

Apesar de ser inferior à de determinadas balanças, essa resolução é mais do que suficiente para a observação do fenômeno estudado.

Como sabe-se que 6,0 kgf é um valor superdimensionado podemos usar um resistor 82 Ω (Série E12) que nos daria uma resolução de 6 gf. Porém forneceria um sinal saturado para valores superiores a 5,7 kgf o que ainda é perfeitamente plausível.

5.2.1.1.3 Fabricação

Com o projeto da célula definido partiu-se para a fabricação do corpo da célula.

O corpo foi usinado a partir de um tarugo único de alumínio aeronáutico, foi torneado para adquirir as características de cilindridade adequadas e posteriormente teve seu sulco fresado, seguindo o desenho de fabricação apresentado no Apêndice I. A peça em processo de fabricação pode ser vista na Figura 20 e a mesma acabada já rosqueada no flange de fixação pode ser vista na Figura 21.



Figura 20 - Célula de carga durante o fresamento da estricção que receberá os extensômetros, a peça em nylon serve para proteger a rosca de fixação de cavacos gerados no processo.

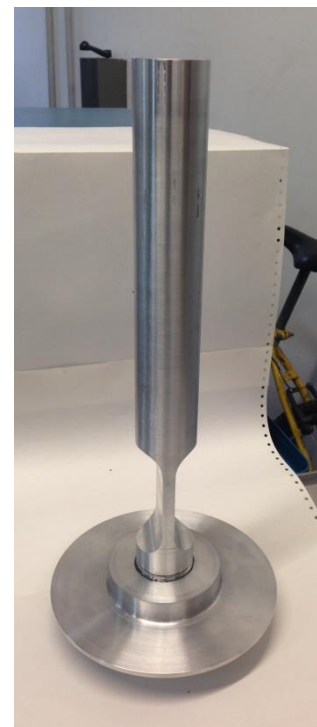


Figura 21 - Célula de carga totalmente usinada rosqueada ao flange de fixação

5.2.1.1.4 Colagem dos extensômetros

Com o auxílio do colega Prof. Dr. João Alcino do Departamento de Engenharia Naval foi possível efetuar a colagem dos extensômetros na célula de carga. O posicionamento de cada um dos *gages* é feito com fita adesiva após preparo da superfície com uma lixa fina e sua fixação permanente é feita com a aplicação de cianoacrilato. A Figura 22 mostra o posicionamento preliminar de cada extensômetro e a Figura 23 mostra o estado final já com a fiação soldada nos *tabs*.

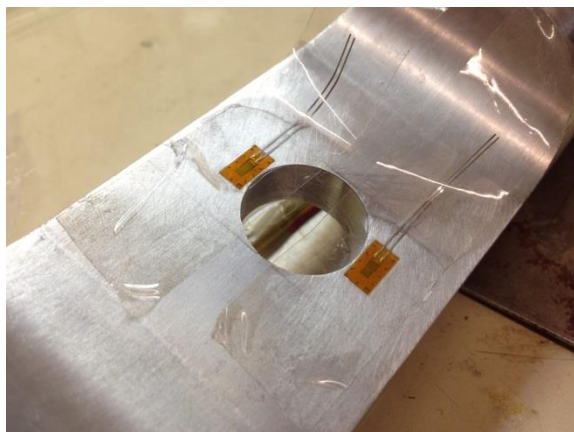


Figura 22 - Posicionamento preliminar dos extensômetros

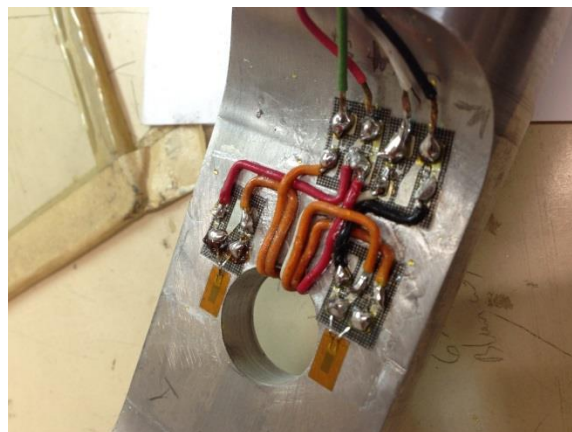


Figura 23 - Fixação final dos extensômetros com a fiação soldada

5.2.1.2 Fixação da célula de carga

A hipótese principal do modelo adotado até este ponto se baseia no argumento de que haverá um engaste perfeito na base. Como fisicamente essa união não é possível deve-se projetar uma fixação da célula ao tampo da mesa que tente se aproximar ao máximo dessa condição ideal.

Foi proposta então uma fixação roscada em relação à célula e parafusada ao tampo da mesa, semelhante a um flange usado em tubulações. O material utilizado será o alumínio comum (5052) devido à compatibilidade química com o material da célula de carga e ao baixo custo.

A Figura 24 mostra a peça no modelo em CAD.

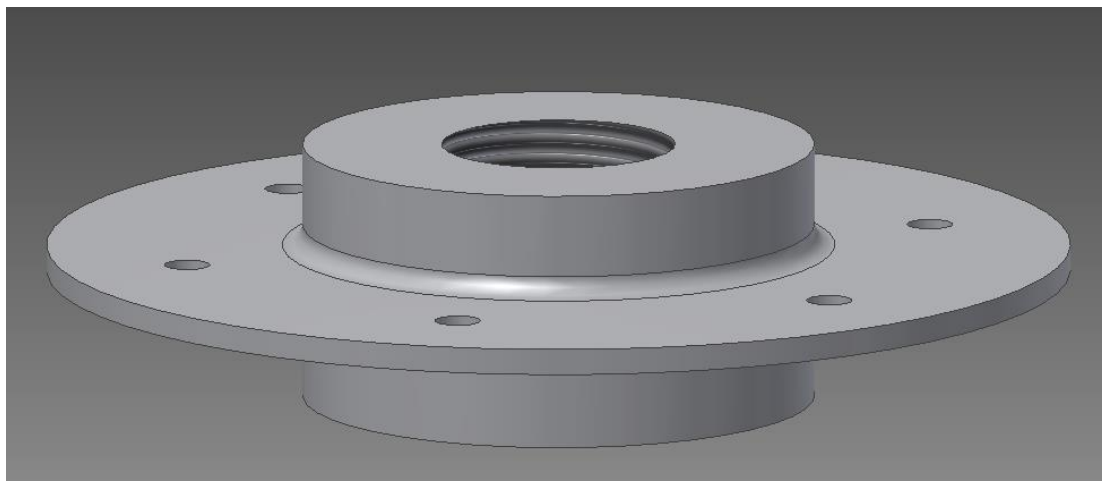


Figura 24 - Fixação da célula de carga

A peça é um flange único com furo central roscado. O furo central é passante e possui rosca M50 torneada com passo compatível com o existente na célula de carga. A peça possui um comprimento de um diâmetro, conforme recomendado, 50 mm. A fixação no tampo é feita com 6 conjuntos de parafuso, porca e arruela M8.

Devido à existência dessa peça, a célula foi estendida em 60 mm, passando agora a ter 460 mm porém todos os cálculos feitos anteriormente ainda são válidos dado que a superfície livre continua com 400 mm. A peça sem os furos de fixação com a mesa pode ser vista na Figura 25 ligada à célula de carga.

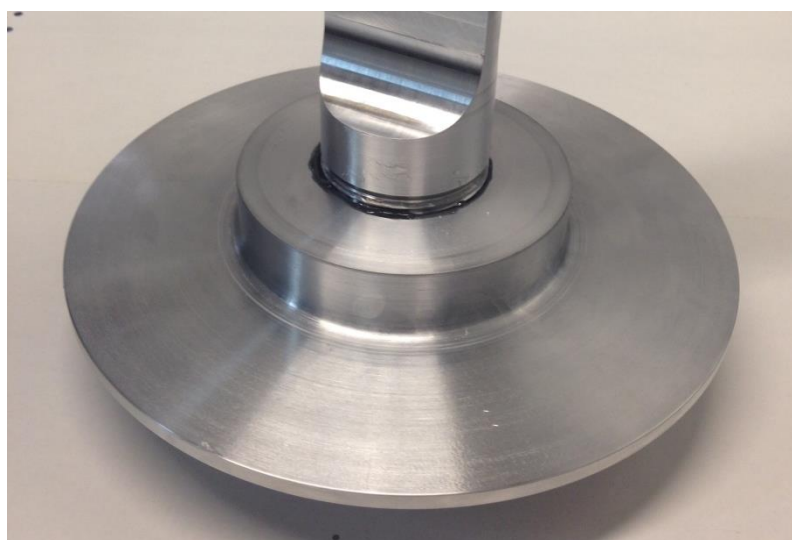


Figura 25 - Flange de fixação da célula de carga acoplado à célula.

5.2.1.3 Suporte do motor e acessórios

O motor e os acessórios são fixados em uma chapa de alumínio comum (5052) com espessura de 5 mm por se tratar de um material disponível e que já foi utilizado com sucesso para este fim na antiga montagem (medidor de empuxo em “L”). A chapa é fixada na célula de carga através de 3 parafusos tamanho M4.

Os motores a serem testados possuem furação distinta, portanto o suporte não poderia ser único. Para evitar que a estrutura seja desmontada toda vez que se necessitar da troca de motor foi projetado um suporte composto de duas peças, uma fixação universal, que estará sempre montada e uma fixação específica com a furação de cada motor, presa por 4 conjuntos porca, parafuso e arruela na fixação universal, como mostra a Figura 26.

A fabricação foi feita através de fresamento de uma chapa única de alumínio, produzindo todos os suportes, os vincos foram obtidos utilizando a fresa na vertical, a Figura 27 mostra os suportes específicos para cada motor em processo de fabricação e a Figura 28 mostra tanto o suporte universal quanto um dos suportes específicos já finalizados.

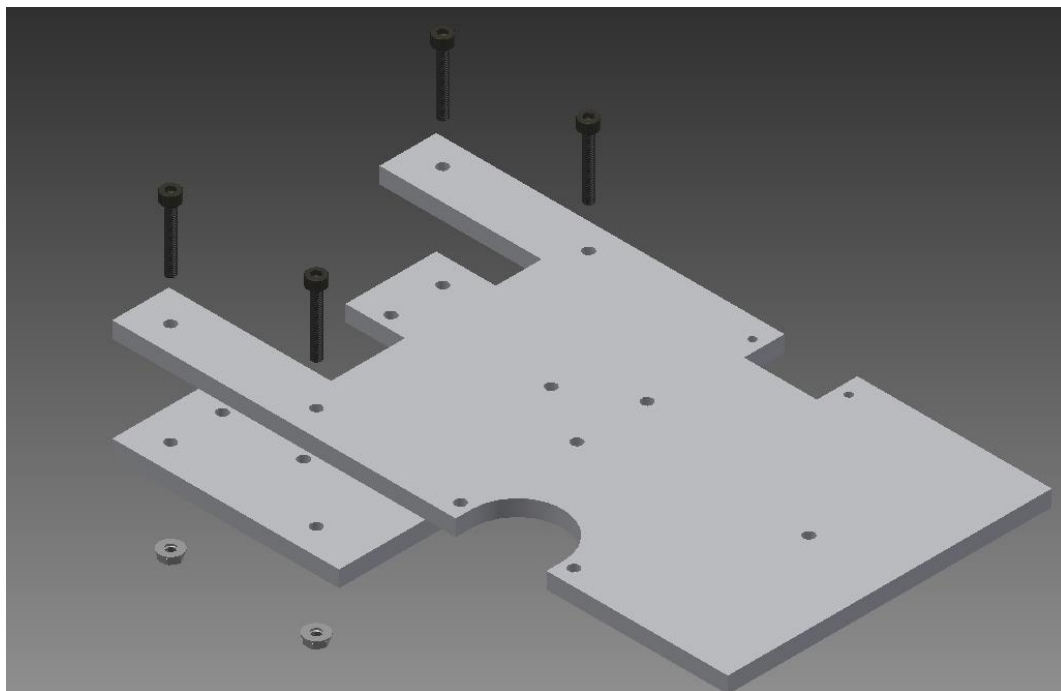


Figura 26 - Fixação universal (superior), sempre fixa à célula de carga pelos três furos centrais e fixação específica (inferior) com a furação compatível com cada um dos motores.

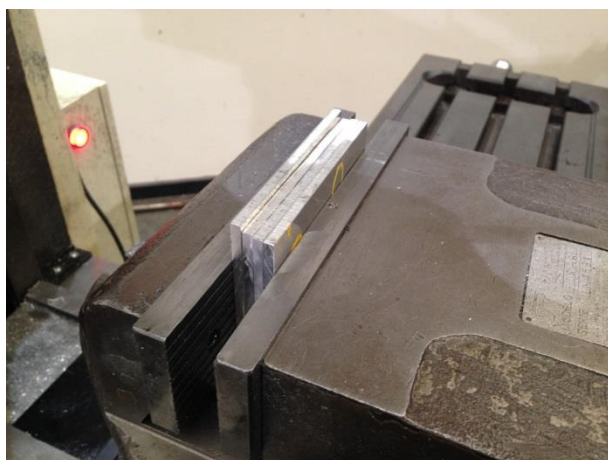


Figura 27 - Suporte específicos dos motores em fabricação (fresa)



Figura 28 - Suporte universal (superior) e específico (inferior) finalizados

5.2.1.4 Suporte do tanque de combustível.

Toda a estrutura foi projetada de tal maneira que, quando o motor estivesse fixado no lugar, praticamente não haveria momento fletor na célula de carga. A distribuição do peso no suporte deveria ser o mais simétrica possível.

A princípio o tanque iria ser fixado ao suporte universal já detalhado anteriormente, porém a variação de massa durante o teste (gasto de combustível) provocaria um *offset* no momento fletor, interferindo diretamente na medição do empuxo pelos extensômetros.

Dessa forma foi projetado um suporte separado fixado diretamente ao tampo da mesa para o tanque.

O suporte consiste em uma haste metálica dobrada convenientemente a partir de um tubo de 1/2" com uma pequena chapa fixada no topo, apenas para dar apoio ao tanque.



Figura 29 - Modelo em CAD da haste de fixação do tanque de combustível

A haste ficará alinhada com a célula de carga, portanto não ocasionará nenhuma perturbação adicional ao escoamento. A Figura 29 mostra o modelo em CAD da haste.

A junção da haste com o tampo da mesa e com o tanque se dá de maneira análoga à junção da célula de carga. Dois pequenos flanges idênticos, um inferior, visto na Figura 29, e um superior, escondido pelo tanque de combustível foram usinados.

5.2.1.5 Acomplamento por chicote

Outra grande função da bancada, além de promover uma coleta integrada dos dados, é proporcionar um ensaio mais seguro para o operador. Um dos principais

acidentes que ocorrem neste tipo de operação é o contato dos dedos com a hélice em alta velocidade ou com o cabeçote quente do motor.

Para que o motor tenha seu desempenho máximo, tanto durante o ensaio quanto durante a competição, é fundamental a regulagem da agulha do carburador, mostrada na Figura 30.

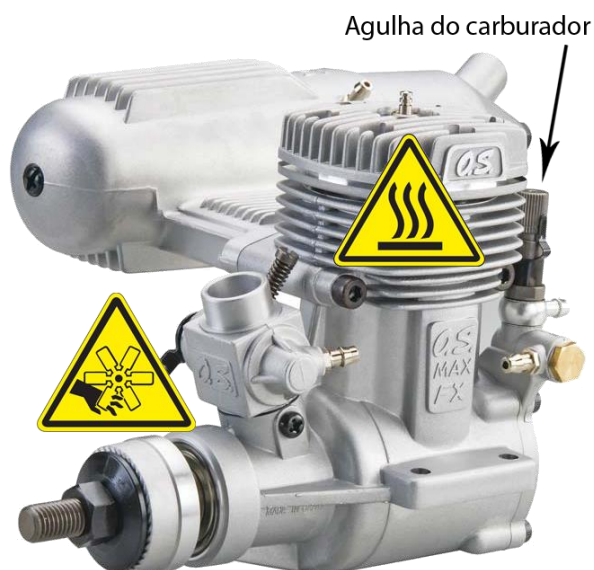


Figura 30 - Perigos ao operador

Dado que a agulha está muito próxima da hélice e do cabeçote e que ela deve ser ajustada com o motor ligado em potência máxima foi desenvolvida uma pequena solução para que não se tenha contato manual durante a regulagem, diminuindo muito a chance de acidentes.

O equipamento consiste de um motor de passo ajustado remotamente por um potenciômetro, ambos serão detalhados adiante. A ligação do motor de passo com o cabeçote da agulha será feita por meio de um chicote conforme mostra a Figura 31.

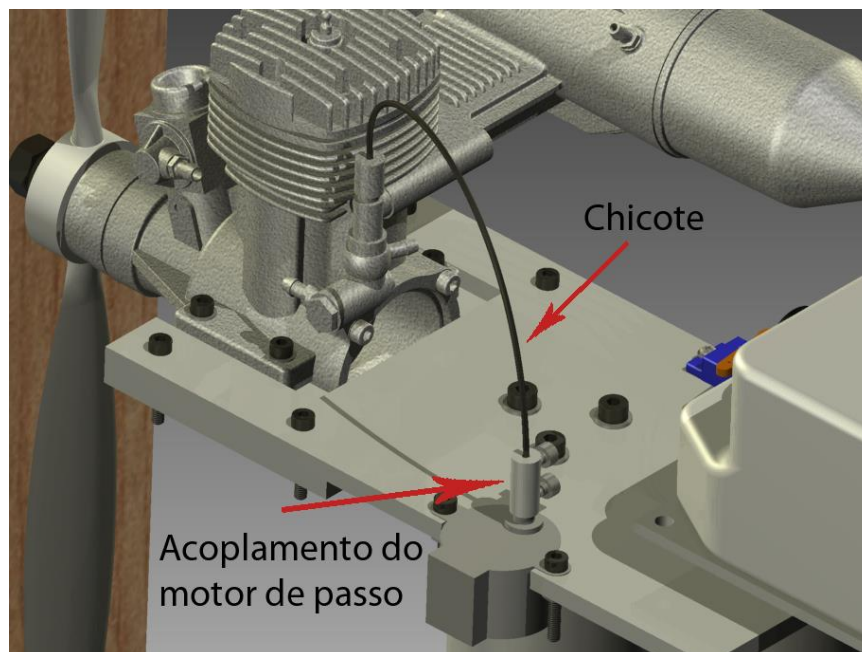


Figura 31 - Montagem da transmissão por chicote

Para tal é necessária uma pequena peça cujo desenho de fabricação se encontra no Apêndice I que faz o acoplamento do eixo de saída do motor de passo com o cabo de aço que será usado como chicote. É interessante notar que a agulha do motor já é preparada para este tipo de acoplamento, facilitando muito sua concepção.

5.2.1.6 Mesa

A mesa utilizada possui uma estrutura em aço com perfis L. Sobre a estrutura é fixado um tampo quadrado de aço de 600 mm de lado com espessura aproximada de 5 mm através de 8 conjuntos parafuso, porca e arruela M8. É interessante que a inércia da mesa seja bastante alta de tal forma que não haja nenhum deslocamento que possa influenciar na medição tendo certeza de que todos os esforços do motor estarão concentrados apenas no estrangulamento da célula de carga.

A mesa concluída pode ser visualizada na Figura 32 já contemplando todos os furos para a instalação do flange que irá fixar a célula de carga e a fixação da haste para suportar o tanque de combustível.



Figura 32 - Mesa para suporte do aparato experimental

5.2.1.7 Ensaio de vibração

Com todos os componentes fabricados e montados realizou-se um ensaio de vibração no laboratório de medições da Escola Politécnica da USP, tomando-se como referência a “Experiência 6 – Análise de Sinal (acelerômetro)” de (TAMAI et al., 2013).

O ensaio teve por objetivo detectar as frequências naturais para os modos mais importantes de vibração da bancada. Previamente foram concebidas as frequências e direções mais importantes do sistema.

A primeira frequência, que se manifesta na direção vertical, é da movimentação do pistão dentro do motor de 2 tempos. Por medições históricas do aerodesign a rotação do eixo do motor em potência máxima é de aproximadamente 12.000 rpm, ou seja, 200 Hz.

A outra frequência importante para estudo, que se manifesta no sentido do escoamento do túnel de vento, é a frequência de *vortex shedding* da célula de carga. Considerando os seguintes dados:

Tabela 6 - Dados para cálculo do número de Reynolds

Diâmetro do cilindro	50,0 mm
Velocidade do escoamento (máxima)	20,0 m/s
Massa específica do ar (25°C, 1 bar)	1,168 kg/m ³
Viscosidade dinâmica do ar (25°C, 1 bar)	18,48.10 ⁻⁶ Pa.s

De tal forma que:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

Portanto:

$$Re = 64200$$

Para o número de Reynolds obtido o número de Strouhal é aproximadamente constante (BLEVINS, 1990).

$$St = \frac{f \cdot D}{V} = 0,2$$

Portanto a outra frequência a ser considerada é:

$$f = 80 \text{ Hz}$$

5.2.1.7.1 Montagem do experimento

Para realizar o experimento 4 combinações de posicionamento do acelerômetro e localização da excitação foram definidos:

Tabela 7 - Definição dos ensaios de vibração

Nº do ensaio	Localização do acelerômetro	Eixo de ação do acelerômetro	Excitação	Direção da excitação	Nome do arquivo
1	Frente da mesa	Direção do escoamento	Frente da mesa	Direção do escoamento	Frente_Mesa
2	Tampo da mesa	Direção vertical	Suporte universal	Direção vertical	Tampo_Suporte

3	Ponta do eixo do motor	Direção do escoamento	Célula de carga	Direção do escoamento	Nariz_Celula
4	Ponta do eixo do motor	Direção do escoamento	Suporte universal	Direção do escoamento	Nariz_Suporte

Todos os ensaios foram realizados com frequência de amostragem de 10 kHz durante um tempo de 2 s, totalizando 20.000 pontos. A excitação foi feita com um pequeno martelo com ponta emborrachada. Cada ensaio foi repetido 3 vezes.

O acelerômetro utilizado foi o 352C33 da PCB Piezotronics com sensibilidade igual a 100.5 mV/g e *bias level* de 10,9 V. Para facilitar a leitura dos dados foi utilizado um condicionador de sinal modelo 480E09 com ganho de 10 vezes da mesma fabricante do acelerômetro.

A Figura 33 mostra a montagem para o ensaio 1 e Figura 34 para os ensaios 3 e 4.

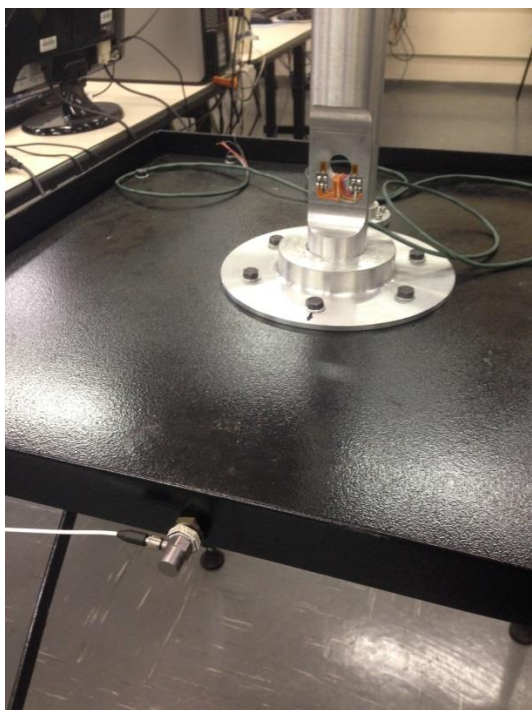


Figura 33 - Montagem para o ensaio de vibração 1

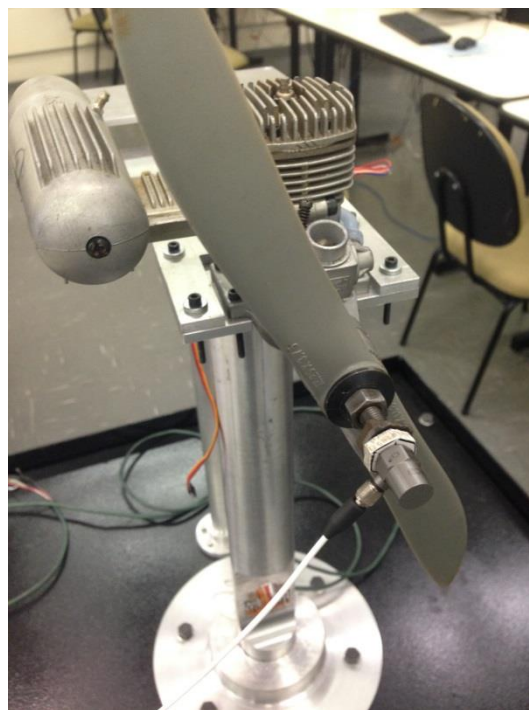


Figura 34 - Montagem para os ensaios de vibração 3 e 4

5.2.1.7.2 Análise dos dados obtidos

A Figura 35 mostra todos os sinais captados durante o ensaio.

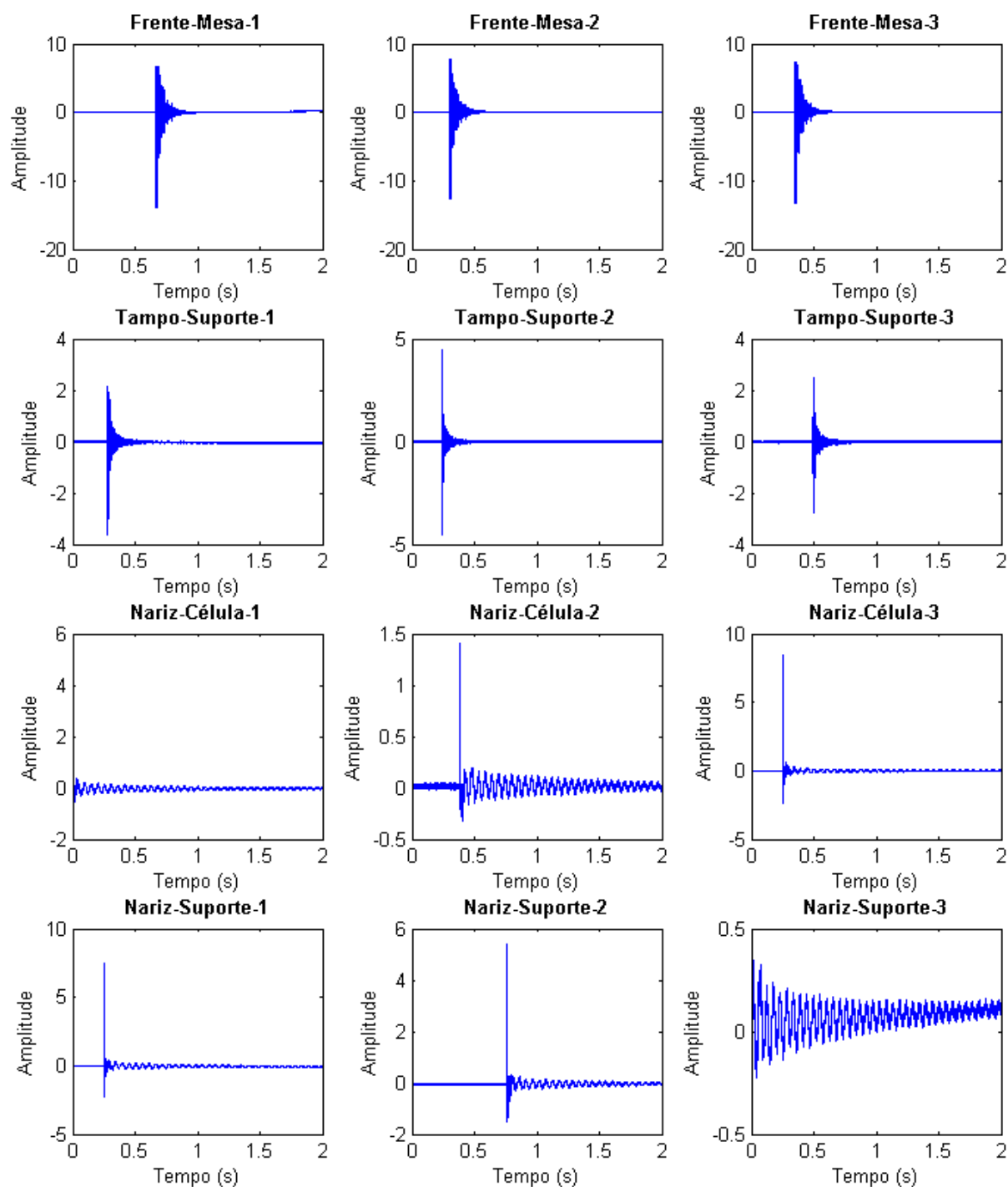


Figura 35- Sinais obtidos durante o ensaio

Após o corte da região antes da excitação foi aplicada uma Transformada Rápida de Fourier no software *MATLAB*® e os resultados foram plotados nas figuras

subsequentes com destaque para as três primeiras frequências naturais de cada um deles.

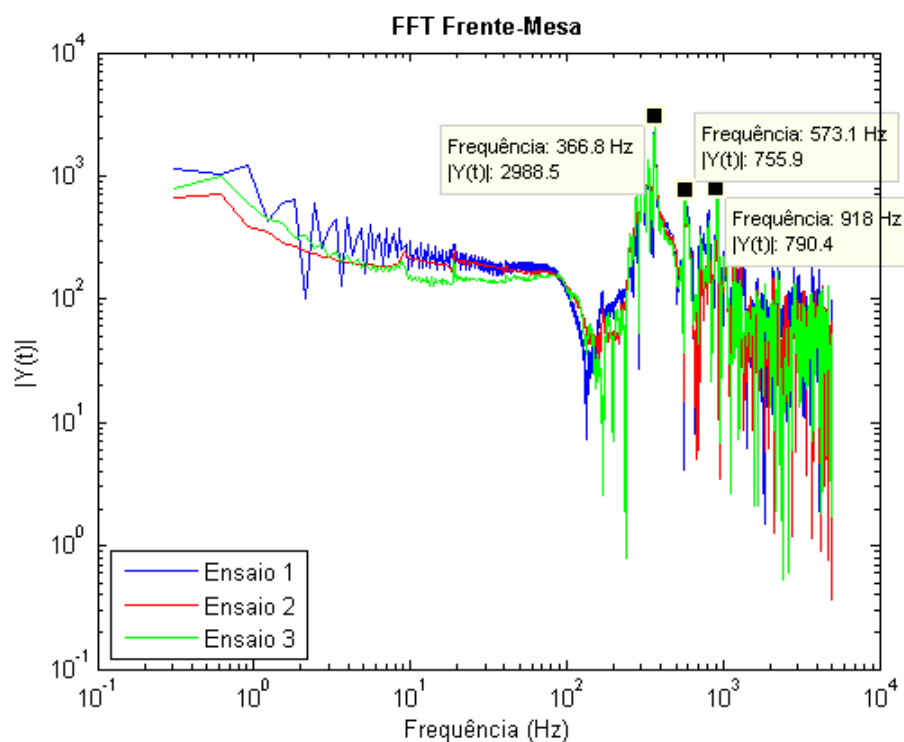


Figura 36 - FFT do Ensaio Frente-Mesa

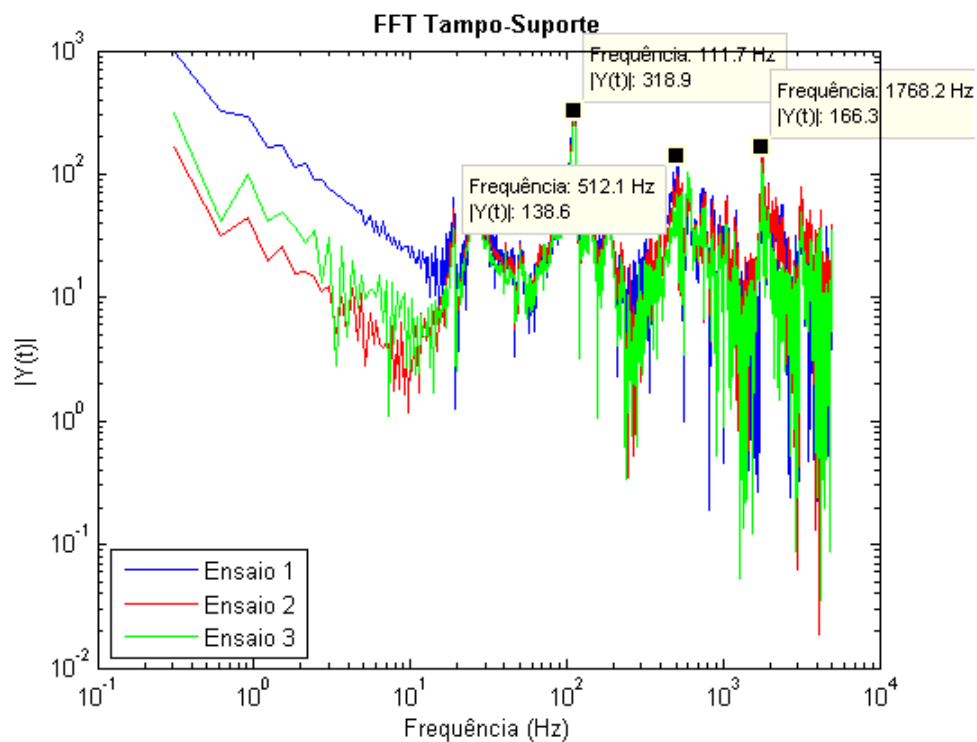


Figura 37 - FFT do Ensaio Tampo-Suporte

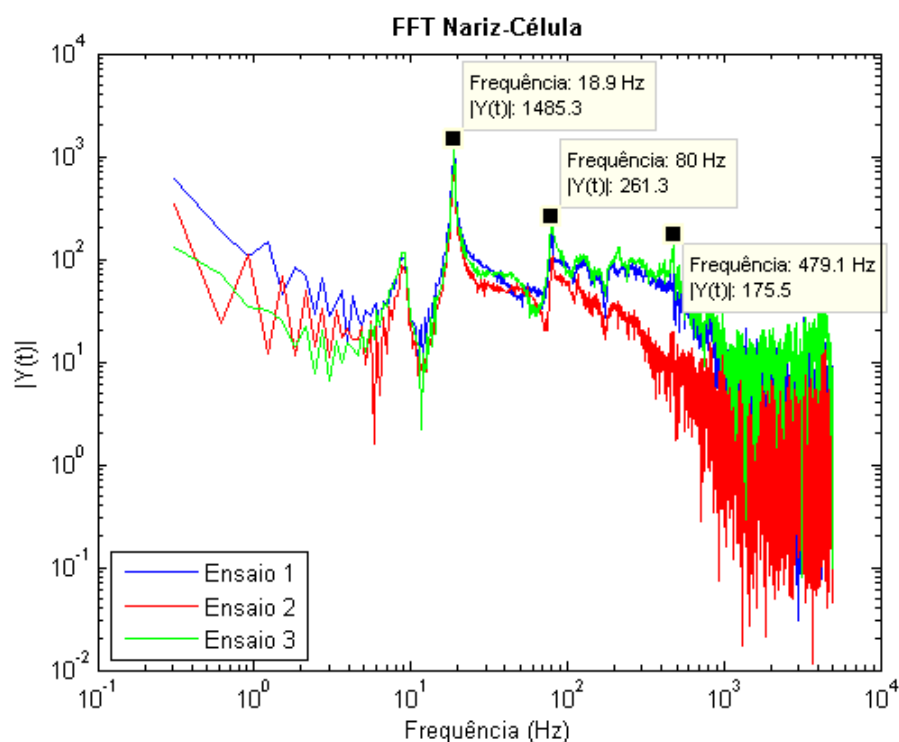


Figura 38 - FFT do Ensaio Nariz Célula

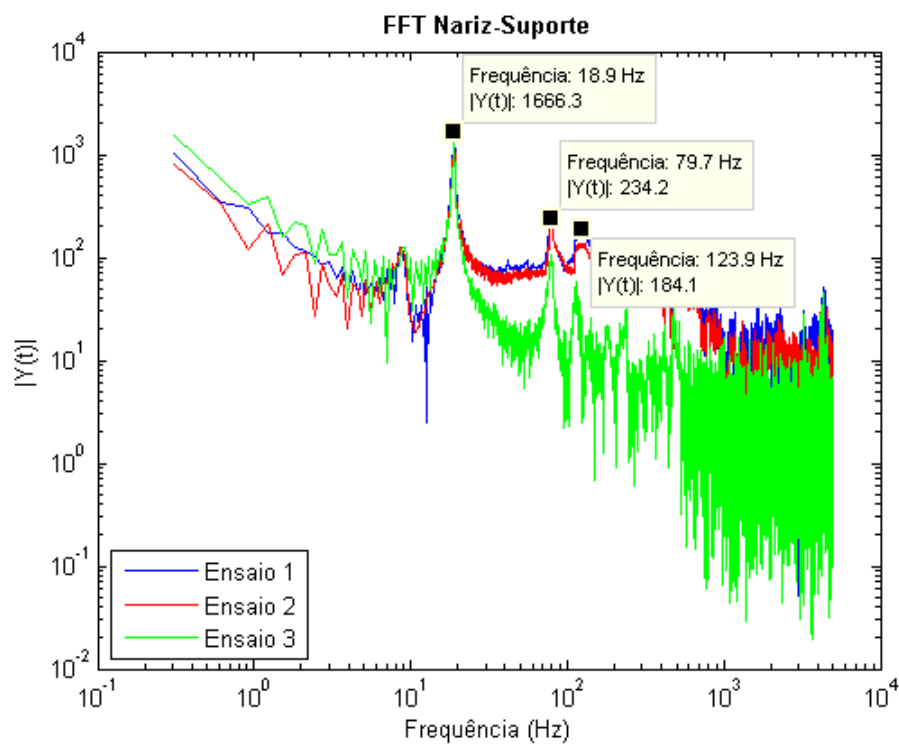


Figura 39 - FFT do Ensaio Nariz-Suporte

Analisando as frequências obtidas conclui-se que não há problema com relação à excitação provocada pelo deslocamento do pistão do motor.

No entanto vale notar que a frequência de descolamento de vórtices do cilindro da célula de carga foi detectada como uma das frequências naturais no modo de excitação de mesma direção. Isso sugere que problemas podem surgir quando o ensaio do túnel ocorrer na velocidade máxima.

Até este momento não foi possível observar esse comportamento no túnel de vento, no entanto, caso seja observado, a solução é construir um aerofólio simétrico ao redor do cilindro exposto ao escoamento de forma a mitigar este efeito. Foi proposto um perfil NACA0012 em isopor com espessura igual ao diâmetro do cilindro.

Vale notar que o tamanho do perfil conflita com o posicionamento do suporte do tanque. Por isso foi feito um furo permitindo que as duas estruturas vibrem separadamente, não interferindo na medição dos extensômetros. A Figura 40 mostra a instalação do perfil.

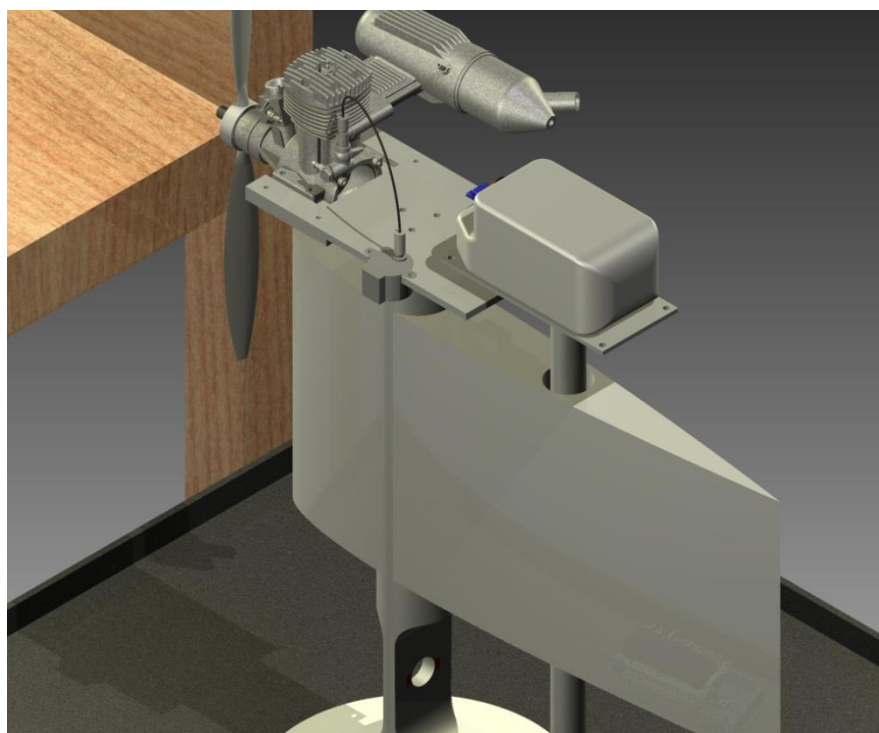


Figura 40 - Célula de carga com perfil NACA 0012

5.2.2 Projeto eletrônico

A eletrônica presente na bancada permitirá a coleta integrada dos dados do ensaio e que permitam sua extrapolação para as diversas condições climáticas encontradas pela equipe.

Na seção 4 foram definidos os parâmetros e grandezas a serem medidos durante o ensaio.

O esquema eletrônico básico é apresentado na Figura 41.

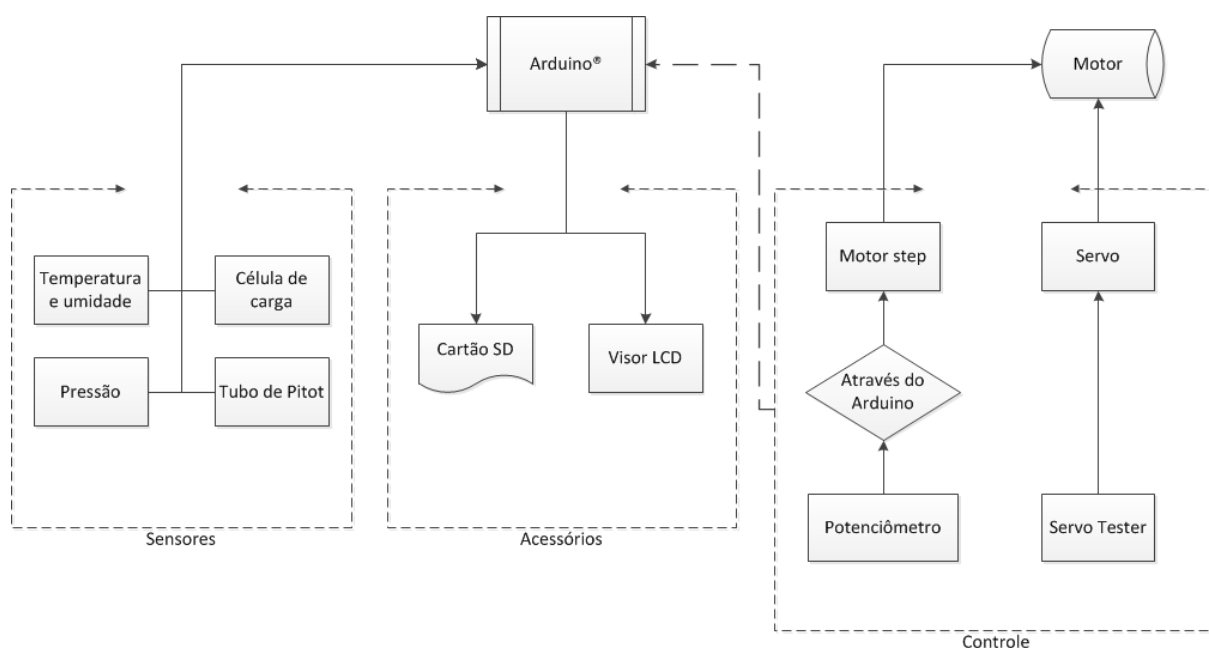


Figura 41 - Esquema eletrônico básico

Este esquema divide o sistema global em três subsistemas, o dos sensores, o dos acessórios e o de controle. Além da placa de integração que foi escolhida, o *Arduino®* que será descrito adiante.

5.2.2.1 Sensores

O subsistema dos sensores captará todos os dados relevantes ao ensaio tanto para cálculo da altitude-densidade quanto para o levantamento da curva de motor. Foi dada preferência nessa seleção no baixo custo dos sensores e também a facilidade

da conexão dos mesmos com o *Arduino®*. As informações foram retiradas diretamente do datasheet dos produtos.

5.2.2.1.1 Sensor de pressão atmosférica (Barômetro)

- Modelo: BMP085 (Bosch);
- Incerteza: ± 1 hPa;
- Resolução: 0,01 hPa;
- Faixa de medição: 300 a 1100hPa.



Figura 42 - Sensor de pressão atmosférica

5.2.2.1.2 Sensor de temperatura e umidade

- Modelo: AM2302/DHT22;
- Incerteza: $\pm 5\%$ UR e $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- Resolução: 0,1% UR e $0,1^{\circ}\text{C}$;
- Faixa de medição: 0 a 100% UR (pouco provável, apesar de ser um dado fornecido pelo fabricante) e -40 a 80°C .



Figura 43 - Sensor de temperatura e umidade

5.2.2.1.3 Sensor diferencial de pressão (Pitot)

- Modelo: S-850 (Vectus);
- Incerteza: $\pm 2,5$ Pa;
- Resolução: 0,5 Pa;
- Faixa de medição: -250 Pa a 250 Pa.



Figura 44 - Sensor diferencial de pressão

5.2.2.2 Controle

Este subsistema possuirá todos os itens necessários para o controle do conjunto motopropulsor. É interessante notar que este sistema é praticamente independente do *Arduino®* e, apesar de não estar previsto, dados de posicionamento podem ser capturados para definir, por exemplo, o ângulo de rotação ideal da agulha do carburador para máximo desempenho.

Nesta seleção foi dada prioridade aos equipamentos já possuídos pela equipe. Os equipamentos apresentados serão usados apenas na preparação do ensaio e seus parâmetros serão mantidos fixos durante todo o mesmo.

5.2.2.2.1 Servo

O servo-motor, modelo SG90, terá como função controlar a abertura do carburador durante o ensaio. Apesar de os testes sempre serem feitos com o empuxo máximo (carburador completamente aberto) muitas vezes para estabilizar a rotação do conjunto propulsor é necessário algum ajuste prévio, dessa forma é importante um controle fino da passagem de ar.



Figura 45 - Servo SG90

5.2.2.2.2 Servo tester

O Servo Tester, modelo Turnigy 760LV-HV, tem a função apenas de controlar o servo no momento da partida do conjunto propulsor, até que sua rotação seja estabilizada. Após este evento ele é deixado de tal forma que a abertura do carburador seja máxima para então se iniciar a realização do ensaio.



Figura 46 – Servo Tester

5.2.2.2.3 Motor de passo

O motor de passo, modelo 28YBJ-48, e sua respectiva placa de controle é o único elemento deste subsistema que passa pelo *Arduino®*. Isso se deve à necessidade de controlá-lo através de um potenciômetro, pois ao contrário do movimento do carburador, (realizado pelo servo) que tem um curso de aproximadamente 90°, a agulha do carburador possui um curso de mais de 4 voltas. A transmissão mecânica do movimento do motor de passo para a rotação da agulha será feita com um chicote.



Figura 47 - Motor de passo

5.2.2.2.4 Potenciômetro

O potenciômetro tem por função o controle do motor de passo para que se possa, à distância, controlar a agulha do motor de forma a obter um rendimento ótimo e realizar o ensaio nessa condição.



Figura 48 - Potenciômetro

5.2.2.3 Acessórios

O subsistema de acessórios engloba o armazenamento e exibição dos dados de ensaio e serão as duas únicas saídas de dados do *Arduino®*.

5.2.2.3.1 Leitor de cartão SD

O leitor de cartão fará a coleta de todos os dados provenientes dos sensores e os gravará em um cartão de memória em um formato conveniente ainda a ser definido. O cartão SD é então transferido para o computador onde o pós-processamento dos dados é realizado e as curvas de empuxo são levantadas.



Figura 49 - Leitor de cartão SD

5.2.2.3.2 Visor LCD

O visor LCD terá duas funções durante o ensaio. Uma é visualizar em tempo real alguns valores convenientes como por exemplo o empuxo, velocidade e altitude densidade. E outra, através de seus botões, de dar comandos para iniciar, pausar e encerrar o ensaio.



Figura 50 – Visor LCD

5.2.2.4 Arduino®

A placa escolhida foi o Arduino MEGA R3®, que possui as seguintes características:

- 256k flash;
- 16 MHz clock;
- 16 analog pins;
- 54 digital I/O pins.

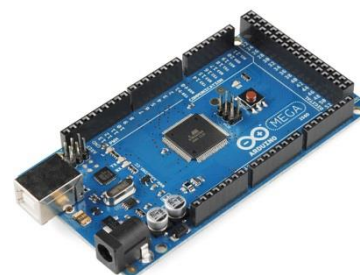


Figura 51 - Arduino Mega R3

5.2.2.5 *Prévia do circuito*

Após a seleção dos componentes a serem utilizados foi feita uma prévia do circuito final, ainda sem a inclusão da célula de carga, com o auxílio do software Fritzing®. A Figura 52 mostra o esquema visual das conexões.

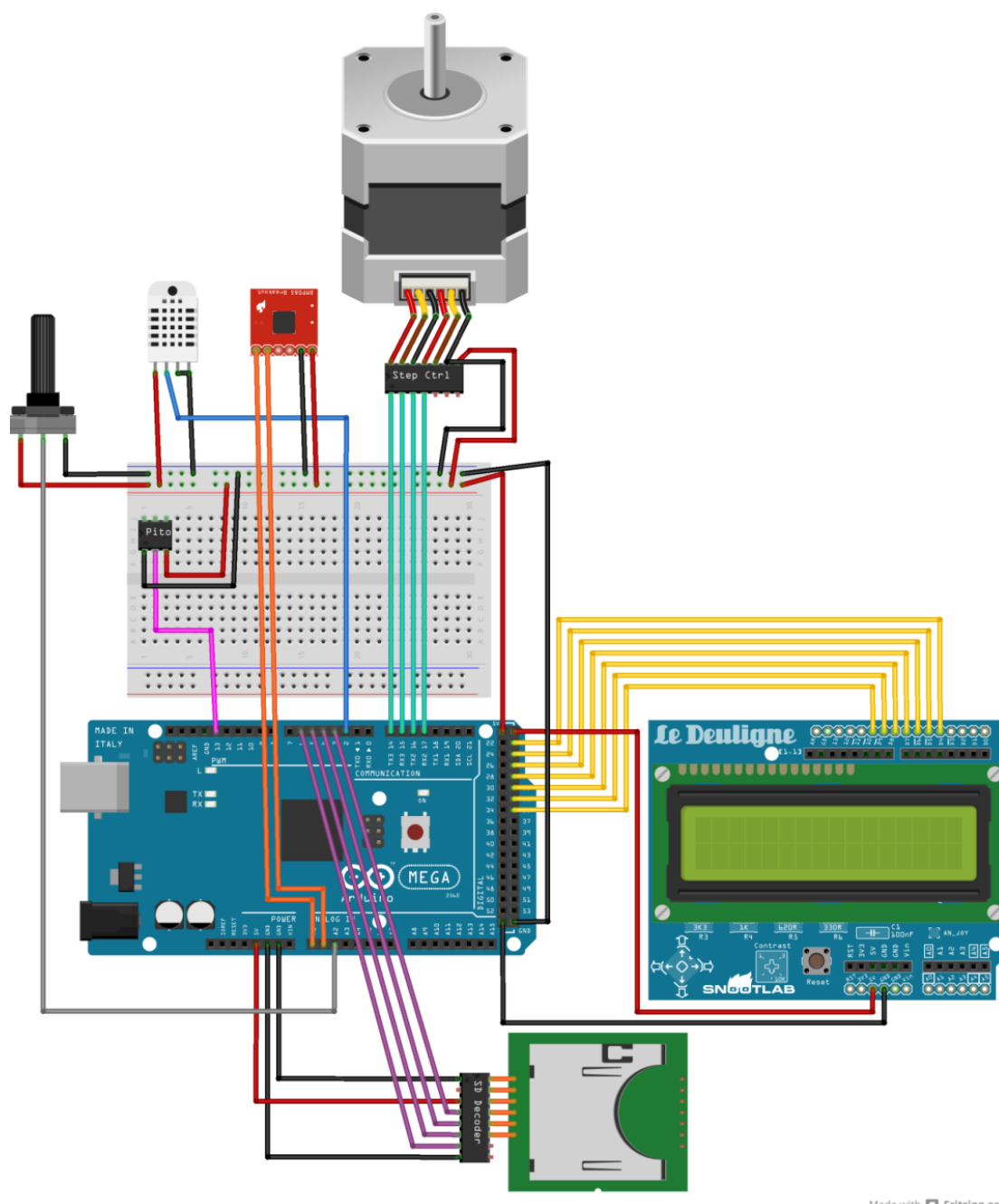


Figura 52 - Esquema preliminar do circuito

Para a confecção final do circuito foi fabricada uma placa de circuito impresso conforme mostra a Figura 53. A grande vantagem da placa é a ausência de boa parte dos fios das conexões. Isso diminui a chance de uma desconexão acidental e produção de erros na bancada.

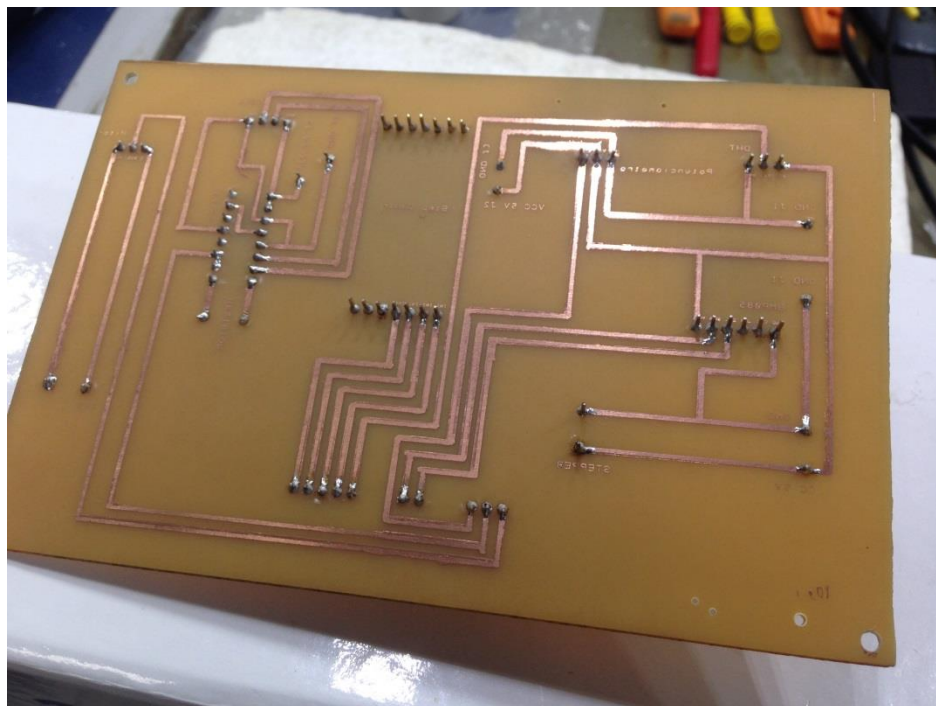


Figura 53 - Placa de circuito impresso da bancada

5.2.2.6 Lógica do programa

A programação será feita de acordo com a lógica apresentada em duas partes, na Figura 54 e na Figura 55.

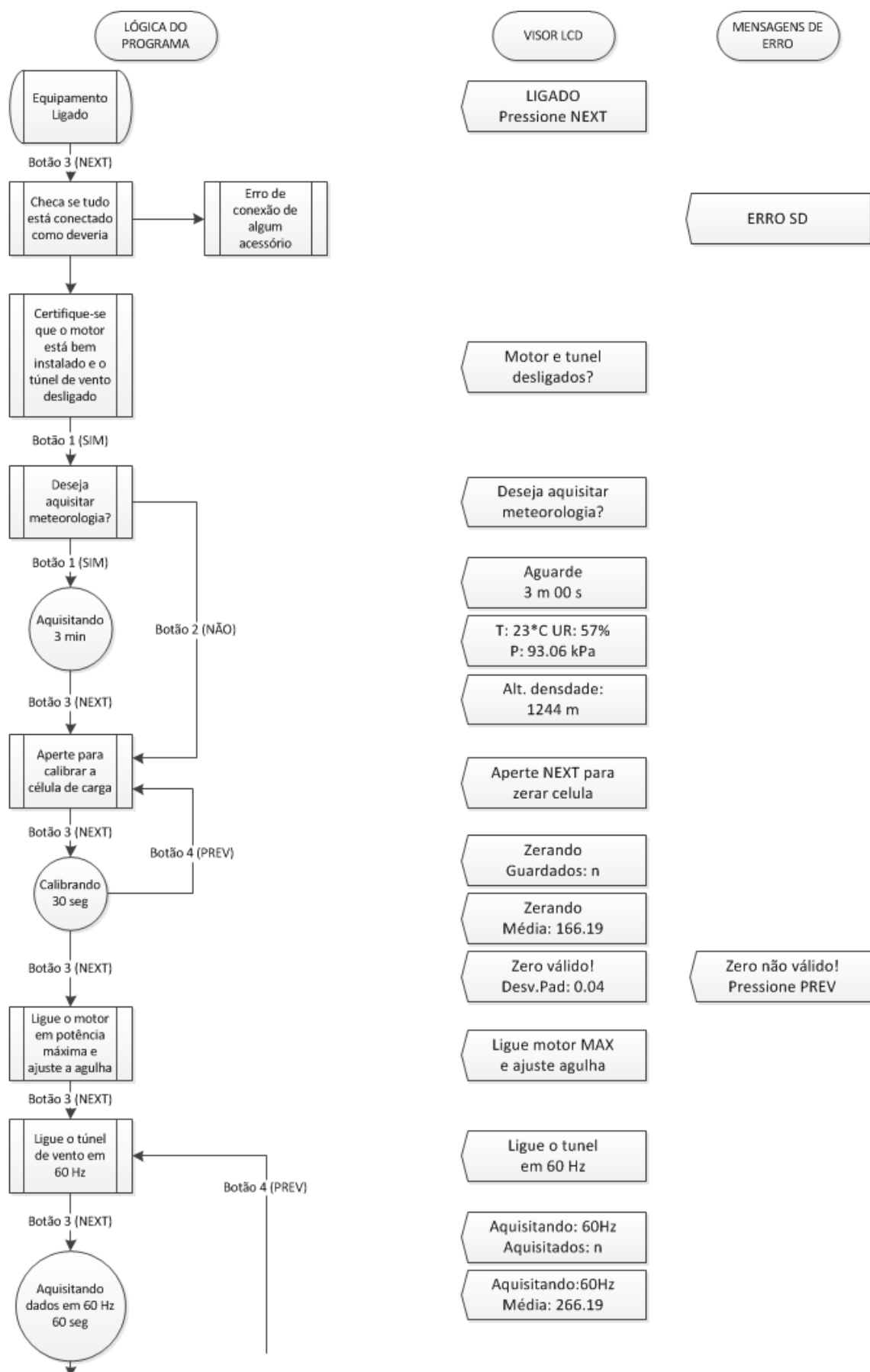


Figura 54 - Rotina do programa - parte 1

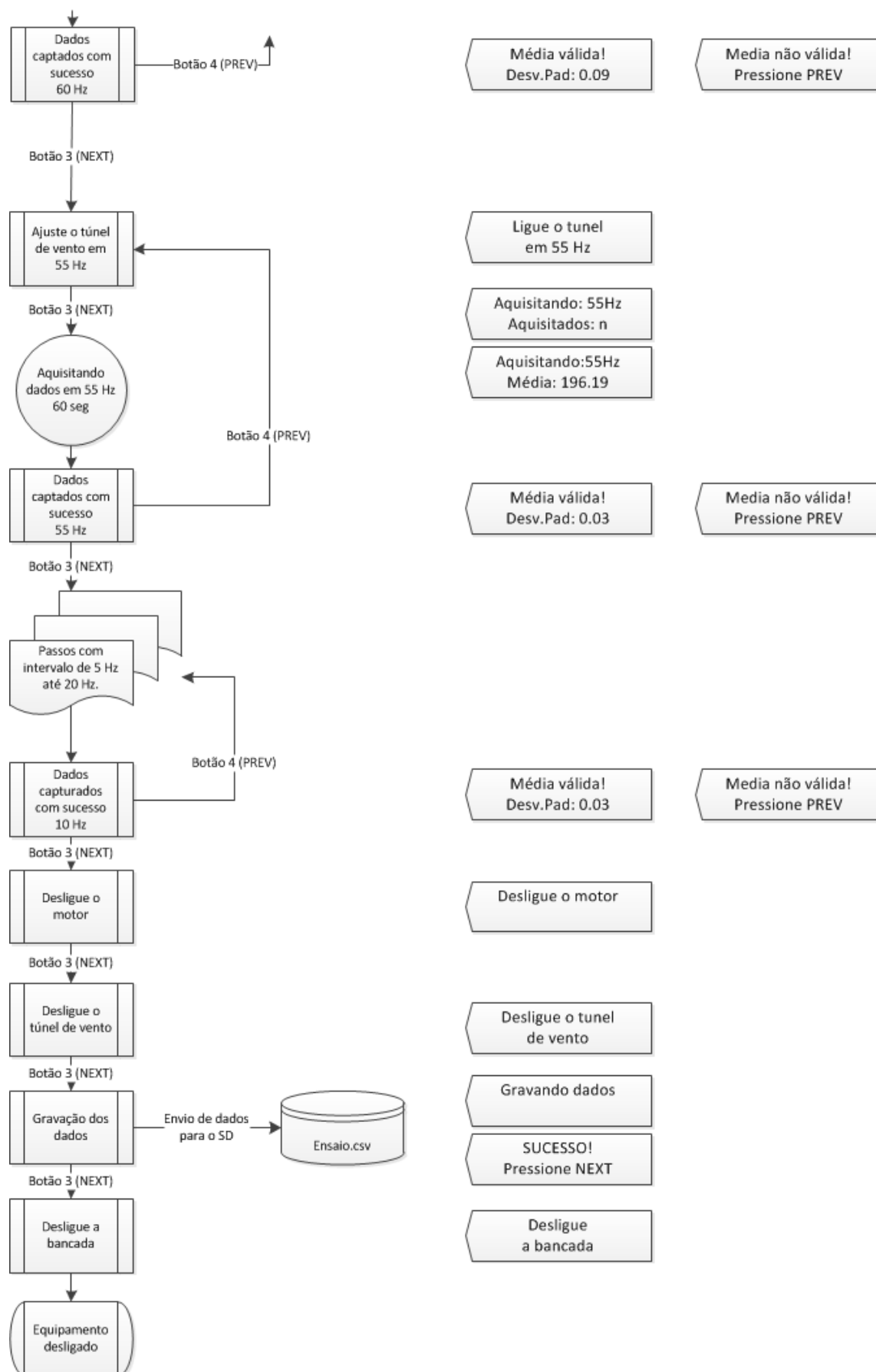


Figura 55 - Rotina do programa - parte 2

É interessante notar que devido à limitação do visor LCD, que possui 2 linhas com 16 caracteres cada, as mensagens de cada etapa são bastante reduzidas portanto foram adotados termos bastante objetivos.

Além disso, os botões utilizados para comando estão integrados ao *shield* do visor LCD e estão programados da seguinte maneira, como mostra a Figura 56.

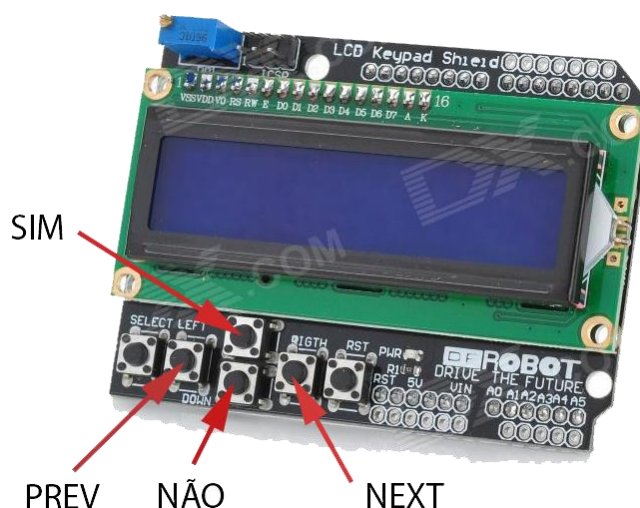


Figura 56 - Layout dos botões de comando

5.2.2.6.1 Validação numérica - Proposição

Ao se trabalhar com aquisição de dados é importante se ter maneiras de filtrar os dados obtidos e checar se eles estão consistentes com a realidade. Para isso primeiramente foi considerada a frequência de amostragem do Arduino®, em torno de 10 kHz segundo o fabricante estando, portanto, bem acima do dobro de qualquer frequência significativa observada no ensaio de vibração (Seção 5.2.1.7). Dessa forma valida-se o Arduino® como plataforma para captar os dados.

No entanto para se ter valores consistentes de medição é preciso lançar mão de artifícios estatísticos para analisar os valores obtidos. Dessa forma foi desenvolvido um método simples de validação numérica que consiste de duas etapas. Este método é aplicado para validação do “zero” da célula de carga e também para todas as aquisições dos extensômetros.

5.2.2.6.2 Validação numérica – Etapa 1

Durante o ensaio serão captados 1000 valores analógicos (entre 0 e 1023) em um ciclo de medição. Esses 1000 valores serão captados na frequência de amostragem nativa do equipamento, levando em torno de 0,1 s. Cada um desses valores será armazenado em uma posição de um vetor. A média e desvio padrão desse vetor são calculados. Caso o desvio seja inferior a um desvio padrão limite estabelecido (neste caso, 20 unidades analógicas, ou seja, 140 g aproximadamente) o valor médio do ciclo (vetor) é guardado em uma posição de um novo vetor, do contrário o valor médio é descartado e um novo ciclo se inicia. Este ciclo se repete até que se tenha um número suficiente de ciclos válidos (neste caso, 100), ou seja com desvio inferior ao limite. A Tabela 8 exemplifica esse procedimento. Cada vez que um ciclo válido é obtido incrementa-se 1 no valor de “n” mostrado no visor LCD da bancada. Passa-se então para a etapa 2.

Tabela 8 - Etapa 1 da validação numérica

Valor	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	...	Ciclo k
1	500	490	502	...	501
2	501	520	499	...	500
3	502	492	501	...	502
4	499	487	497	...	495
...
999	495	530	499	...	495
1000	507	480	503	...	499

Média	500,67	499,83	500,17	...	498,67
Desv. Pad	3,93	20,16	2,23	...	3,01
Ciclos Válidos	1	-	2	...	100

5.2.2.6.3 Validação numérica – Etapa 2

Com o vetor que contém todos os ciclos válidos completo faz-se uma nova operação de média e desvio padrão. Caso esse vetor também apresente desvio padrão inferior ao limite estabelecido ele é validado, sua média é tomada como valor final da medição, seja ela do “zero” de calibração ou dos valores relativos a cada uma das

frequências do túnel de vento durante o ensaio. A Tabela 9 exemplifica esse procedimento.

Tabela 9 - Etapa 2 da validação numérica

Ciclo válido 1	500,67
Ciclo válido 2	500,17
...	...
Ciclo válido 100	498,67

Média	499,83
Desv. Pad	1,04
Medição válida?	SIM

Valor do ponto	499,83
-----------------------	---------------

A alteração dos limites de desvio padrão e número de aquisições para cada amostra atuam como um filtro passa baixa no sistema e foram calibradas para obter resultados coerentes com os esperados.

5.2.2.6.4 Início, aquisição meteorológica e calibração.

Para facilitar a compreensão de algumas mensagens e dados apresentados ao operador durante o ensaio, foram selecionados valores de exemplo que se encontram sublinhados. Estes valores variam a cada ensaio e podem ou não estar próximos dos valores aqui apresentados.

Após energizar o equipamento e acionar o interruptor liga/desliga a mensagem “LIGADO Pressione NEXT” aparece na tela do LCD. O operador então pressiona o botão “NEXT”. Assim a bancada irá verificar se todas as conexões estão feitas corretamente (sensor de temperatura, sensor de pressão atmosférica, potenciômetro, cartão SD, extensômetros, etc.). Caso exista alguma falha, ou seja, algum componente desconectado, será apresentada uma mensagem de erro com o nome do componente que apresentou problema, por exemplo “ERRO SD”, no caso do cartão de memória estar ausente. Caso não haja nenhum problema o visor exibirá “Motor e tunel desligados?”.

Esta mensagem é um aviso de segurança, apenas para ter certeza de que a bancada se encontra pronta para as próximas operações.

Pressionando o botão “SIM” será exibida a mensagem “Deseja adquirir meteorologia?”, caso o usuário aceite (botão “SIM”), será exibida uma contagem regressiva de três minutos (“Aguarde 3 m 0 s”) indicando que está sendo contado o tempo de acomodação dos sensores de pressão atmosférica, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. O tempo de acomodação é necessário para que todos os sensores estejam produzindo valores estáveis, compatíveis com a realidade.

Após o tempo de acomodação é feita a leitura de cada um dos sensores e a altitude densidade é calculada. Estes valores são guardados na memória interna do *Arduino®* e mostrados para o operador em duas páginas do visor. Uma com os dados coletados “T: 23*C UR: 57% P: 93.06 kPA” e, após um pequeno *delay*, “Altitude densidade: 1244 m”. Para prosseguir, o operador deve pressionar a tecla “NEXT”, após a altitude densidade ser exibida.

Caso o operador não deseje adquirir a meteorologia basta apertar o botão “NÃO” para passar para a fase seguinte. O valor “zero” é adotado para todos os parâmetros meteorológicos.

Após esta etapa será exibida a mensagem “Aperte NEXT para zerar célula”. Quando o usuário pressionar o botão “NEXT” a calibração é iniciada e a mensagem “Zerando Guardados: n”, onde “n” é o número de valores aceitos, após a etapa 1 da validação numérica, é exibida na tela com contagem de “n” crescente até 100. Os valores obtidos são os diversos valores da tensão elétrica, já lidos em valores analógicos, na saída do amplificador conectado aos extensômetros.

Após conseguir 100 valores para o “zero” a mensagem “Zerando Media: 166.19”, por exemplo, é exibida e o resultado da etapa 2 da validação numérica é apresentado como, por exemplo, “Zero válido! Desv. Pad: 0.04” caso seja aceito, ou “Zero não válido! Pressione PREV” no caso de não aceitação.

Este valor analógico “zero” é gravado na memória interna do *Arduino®*.

É de suma importância que o operador fique distante e não toque na bancada durante a calibração de tal forma a garantir o valor “zero” como correto.

No caso de um “zero” não válido o operador deve pressionar “PREV” e reiniciar essa etapa. No caso onde o “zero” é válido basta pressionar “NEXT” para prosseguir.

5.2.2.6.5 Aquisição dos dados dos extensômetros.

Na próxima etapa é apresentada a mensagem “Ligue o motor MAX e ajuste agulha”. O operador deve então efetuar o acionamento do motor, munido de um *starter* carregado e um dispositivo que permita girar a hélice para acionamento. Durante o acionamento, o ajuste da agulha será feito com um potenciômetro aliado a um motor de passo, e o ajuste do carburador será realizado através do *Servo Tester*. Após acionamento deve-se colocá-lo na potência máxima. Deve-se ter muito cuidado durante o acionamento, que exige uma força maior, para não danificar nenhum dos equipamentos ou soltar algum fio.

Com o motor no regime máximo deve-se usar o potenciômetro para ajustar a agulha do carburador até que a mistura seja ideal. O indicador de mistura ideal é o ruído característico do motor que demonstra claramente um pico de potência.

Pressionando o botão “NEXT” o controle da agulha é desligado, para que não seja possível alterar sua posição durante o ensaio. Então a mensagem “Ligue o tunel em 60 Hz” é exibida. O operador deve então se dirigir ao inversor do túnel de vento e ligá-lo adequadamente, colocando-o em regime de máxima velocidade de escoamento (60 Hz).

Mais uma vez pressionando “NEXT” a mensagem “Aquistando:60Hz Aquistados:n” é exibida, e o valor de “n” cresce até que 100 valores válidos dos extensômetros, através da etapa 1 da validação numérica, sejam aquistados.

A mensagem “Aqustando: 60Hz Media: 505.27” é exibida e, caso seja válida, é seguida por “Media valida! Desv.Pad: 0.09” ou, do contrário, “Media nao valida!

Pressione PREV”, a validade ou não dos valores é definida pela etapa 2 da validação numérica.

Durante este período também é captada a velocidade do escoamento através do tubo de pitot, ao final da coleta é feita uma média que é armazenada na memória interna do Arduino®.

Após a exibição da mensagem de média válida, o operador deve pressionar “NEXT” para iniciar a próxima etapa, cuja primeira mensagem é “Ligue o tunel em 55 Hz” e novos valores são captados seguindo a mesma lógica.

Este procedimento se repete até a frequência de 20Hz do inversor, onde são captados os últimos valores dos extensômetros e do pitot.

Tanto no caso de uma média válida ou não ao final de uma etapa (60 Hz, 55 Hz, 50 Hz etc.) o operador pode optar por refazer aquela aquisição, para isso basta pressionar “PREV” após a mensagem de média válida. Isso é válido, por exemplo, no caso de uma falha do motor (desligamento abrupto), dessa forma apenas aquela etapa é perdida e reiniciada.

Ao final de cada etapa apenas um único valor de empuxo (valor analógico dos extensômetros) e velocidade do escoamento é guardado na memória interna. Vale notar que o valor analógico do empuxo guardado será o obtido pela medição subtraindo-se o “zero” obtido na etapa anterior. No total serão aqistados 9 pontos, que permitirão a construção da curva de empuxo daquele motor.

Após o término das 9 aquisições é exibida a mensagem “Desligue o motor”. O operador deve cortar o motor e apertar o botão “NEXT”. Então é exibida a mensagem “Desligue o tunel de vento”. O operador deve cortar o motor e apertar o botão “NEXT”. Nesse ponto a mensagem “Gravando dados” é mostrada e é feita a gravação de todos os dados obtidos durante o ensaio no cartão SD em um arquivo denominado “ensaio.csv” que se apresenta com a seguinte estrutura, mostrada na Tabela 10, juntamente com um exemplo.

Tabela 10 – Estrutura do arquivo "ensaios.csv"

Estrutura	Exemplo
Temperatura (°C)	25.32
Pressão (Pa)	92473.2
Altitude Densidade (m)	1413.36
Umidade Relativa (%)	85.2
"Zero" analógico	167.6
Média extensômetros, Média pitot (60 Hz) em valores analógicos.	505.27, 10.13
Média extensômetros, Média pitot (55 Hz) em valores analógicos.	462.45, 11.40
Média extensômetros, Média pitot (50 Hz) em valores analógicos.	438.93, 9.78
Média extensômetros, Média pitot (45 Hz) em valores analógicos.	394.41, 10.01
Média extensômetros, Média pitot (40 Hz) em valores analógicos.	375.34, 11.32
Média extensômetros, Média pitot (35 Hz) em valores analógicos.	327.39, 9.93
Média extensômetros, Média pitot (30 Hz) em valores analógicos.	268.72, 10.50
Média extensômetros, Média pitot (25 Hz) em valores analógicos.	256.39, 11.02
Média extensômetros, Média pitot (20 Hz) em valores analógicos.	223.52, 10.42

Vale notar que, no exemplo, o ensaio realizado foi estático, por isso os valores do pitot se repetem com pequena variação.

Após a gravação a mensagem "SUCESSO! Pressione NEXT" é exibida. Conforme o usuário pressiona "NEXT" a mensagem "Desligue a bancada" é exibida. Nesse ponto o operador pode desligar o interruptor da bancada com segurança.

6 ENSAIOS COM A BANCADA

Com a bancada finalizada foi possível realizar alguns testes para verificar o seu funcionamento e também para realimentar algumas partes do projeto.

6.1 Medição de velocidade

O primeiro problema encontrado foi na aquisição de velocidade do túnel de vento. Uma inversão na polaridade do sensor diferencial de pressão levou à queima do mesmo. Como isso ocorreu apenas uma semana antes da data de entrega deste relatório, não foi possível adquirir estes dados juntamente com o empuxo. Outro sensor já foi encomendado e espera-se que ele esteja em funcionamento até a data da apresentação.

6.2 Calibração

Um dos primeiros procedimentos feitos com a bancada montada e operacional foi a calibração dos extensômetros. Esta etapa permitiria verificar a linearidade entre deformação e tensão, bem como verificar se os cálculos anteriores estavam corretos.

Para a calibração foi utilizada uma montagem com uma polia e um cabo de aço. Em uma ponta foi amarrado o motor, preso à bancada, e em outra foram adicionados pesos calibrados, de tal forma que fosse possível saber exatamente qual a força (em kgf) estava sendo aplicada aos extensômetros. A Figura 57 mostra a montagem para a calibração.



Figura 57 - Aparato para calibração

Houve uma limitação da disponibilidade de pesos calibrados, portanto só foi possível chegar a 2,6 kgf aproximadamente.

Como a calibração era de natureza estática foi admitida uma polia ideal em que não houvesse atrito estático. Para isso a polia real foi lubrificada visando reproduzir essa condição.

Foram discriminadas 4 combinações de pesos calibrados conforme mostra a Tabela 11, para cada um dos 4 pontos, mais o ponto zero, foram obtidos 900 medições. A média e o desvio padrão desses valores também são mostrados na Tabela 11.

Ao colocar estes valores em um gráfico e traçando uma linha de tendência é possível determinar qual a correspondência entre as unidades analógicas e a força em kgf. A Figura 58 mostra os pontos plotados e também a linha de tendência com sua respectiva correlação.

Tabela 11 - Dados de calibração da célula de carga

Massa	Zero	1283 g	1583 g	2083 g	2583 g
Média	167,17	338,83	381,71	448,81	528,08
Desv. Pad.	1,68	1,78	1,79	1,80	2,01

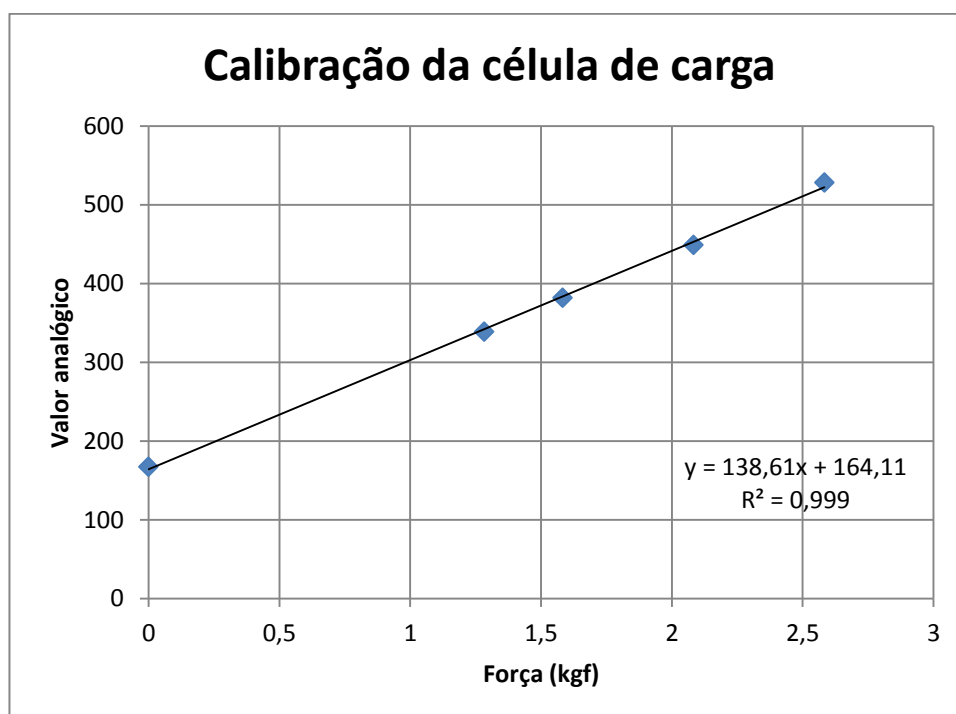


Figura 58 - Gráfico dos valores de calibração

Se compararmos os valores obtidos aos valores de projeto temos:

$$\text{No projeto: } (Analog)_{6kgf} = 889 \text{ e } (Analog)_{1kgf} = 148$$

$$\text{Obtido: } (Analog)_{1kgf} = 138,61 * 1 = 138,61$$

$$\text{Obtido: } (Analog)_{6kgf} = 138,61 * 6 = 831,66$$

A diferença, portanto, entre o valor obtido e o valor projetado é de apenas 6,3%. Considerado um sucesso para a montagem.

Se compararmos também a resolução temos:

$$\begin{aligned} \text{No projeto: Resolução} &= 6,7 \text{ gf} \\ \text{Obtido: Resolução} &= \frac{1000}{138,61} = 7,2 \text{ gf} \end{aligned}$$

Uma diferença de apenas 7,4%.

6.3 Ensaios preliminares

Com a bancada calibrada e o programa 100% operacional foi possível fazer uma aquisição dos dados simulando um ensaio real. No entanto, devido à falha já mencionada do sensor diferencial de pressão foi realizado um ensaio estático variando a abertura do carburador de forma a manter o empuxo variando linearmente.

O motor utilizado foi um OS MAX .61FX em conjunto com uma hélice APC 12.25 x 3.75 *Sport*. A título de comparação este motor, quando usado regularmente pela equipe, produzia entre 3,600 e 3,800 kgf de empuxo em regime de máxima potência. No entanto este exemplar está parado há mais de um ano já que em 2014 a equipe optou pelo motor Magnum XLS .61A.

O cartão SD exportou o seguinte arquivo.

Tabela 12 - Arquivo "ensaio.csv"

25.32
92473.2
1413.36
85.2
167.6
505.27, 10.13
462.45, 11.40
438.93, 9.78
394.41, 10.01
375.34, 11.32
327.39, 9.93
268.72, 10.50
256.39, 11.02
223.52, 10.42

Observa-se que todos os dados foram gravados corretamente e que o cálculo da altitude densidade está correto. Além disso, o “zero” está compatível com o valor obtido na calibração.

O valor do pitot é obtido na forma de ruído, já que não há nenhum componente conectado na respectiva porta lógica.

Utilizando a conversão obtida na calibração obtemos:

Tabela 13 - Pós processamento do arquivo "ensaio.csv"

Valor analógico	Força (kgf)
505,27	3,645
462,45	3,336
438,93	3,167
394,41	2,845
375,34	2,708
327,39	2,362
268,72	1,939
256,39	1,850
223,52	1,613

O valor obtido de empuxo mostra que, mesmo com o tempo sem funcionamento, o motor não perdeu sua capacidade de gerar empuxo. Os dados também validam o

bom funcionamento da bancada. A Figura 59 mostra a bancada completa durante a execução do ensaio estático.



Figura 59 - Bancada finalizada, execução do ensaio estático

7 CONCLUSÃO

O projeto desde seu início se mostrou desafiador tanto pelo conceito quanto pelos seus objetivos.

Com o papel de facilitar a obtenção de dados de um parâmetro decisivo para o projeto das aeronaves do AeroDesign o projeto deveria aliar uma boa precisão na sua instrumentação e também uma fácil operação, de tal forma a permitir muito mais ensaios em um mesmo espaço de tempo, se comparado ao método atual.

A resolução do equipamento ficou em torno de 7 gf, muito próximo dos 5 gf fornecidos pela balança utilizada atualmente. O ensaio como um todo, excetuando-se a parte de montagem, dura em torno de 10 minutos por conjunto propulsor, isso considerando desde a aquisição meteorológica até a finalização da gravação dos dados.

Os suportes de troca rápida permitem que, se realizado em duas pessoas, enquanto um conjunto é testado o outro já seja pré-fixado, necessitando apenas de quatro parafusos para se iniciar um próximo ensaio.

Outro quesito atingido pela bancada, às vezes deixado em segundo plano pela equipe, é a segurança. O controle remoto tanto do carburador quanto da agulha torna o teste extremamente seguro. Praticamente eliminando a possibilidade de ocorrência de acidentes iguais aos que já ocorreram no passado.

A fabricação dos componentes se mostrou a parte mais imprevisível e desafiadora. Ao longo dos quase 18 meses de projeto novas soluções tiveram que ser propostas para um projeto já em andamento, colocando a prova todas as nuances de um projeto de engenharia.

No entanto, a bancada como um todo é apenas um grande primeiro passo rumo ao melhor entendimento e otimização do desempenho dos conjuntos propulsores das aeronaves radio controladas.

Muitos parâmetros ainda podem ser desenvolvidos sobre esse projeto tais como:

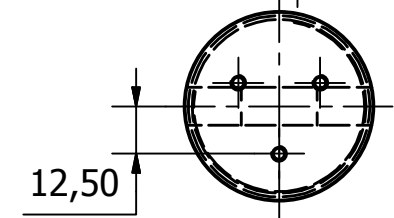
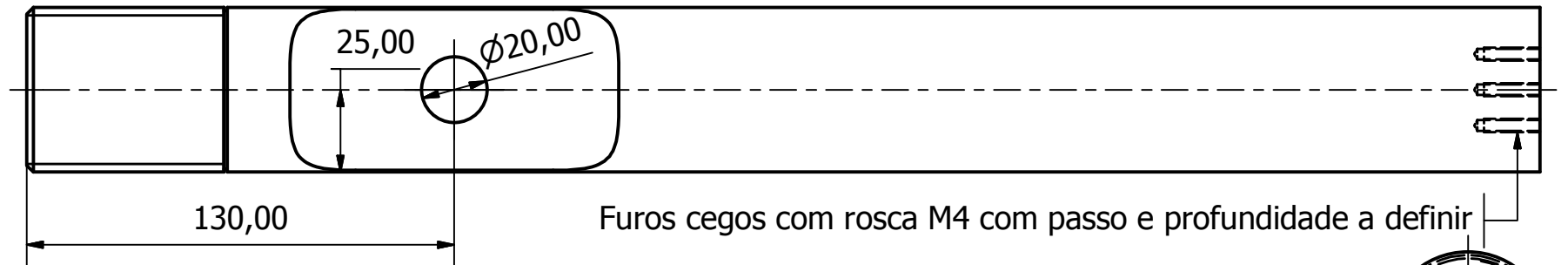
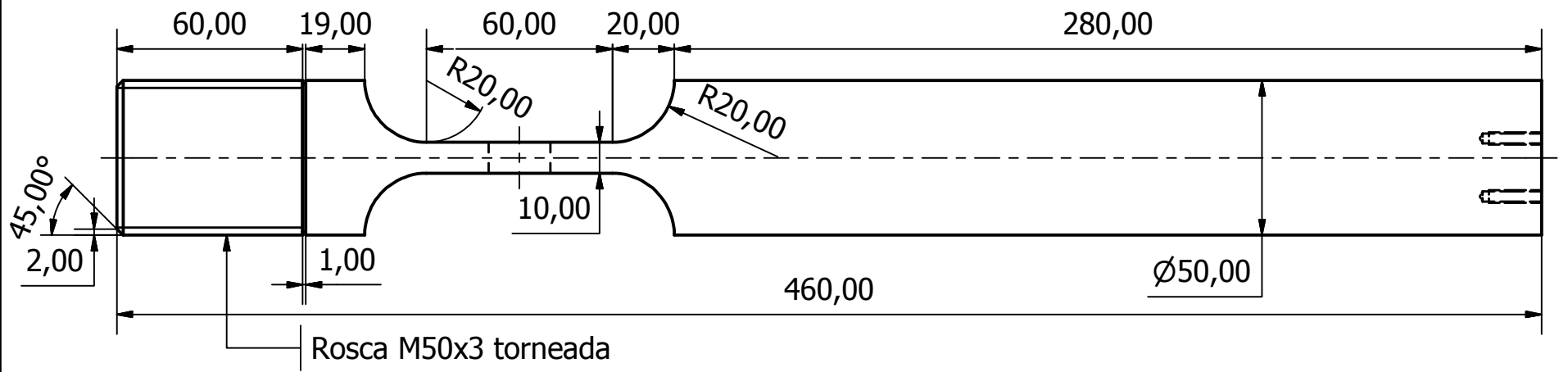
- Medição do consumo de combustível, podendo melhorar o dimensionamento do tanque e diminuindo o peso vazio da aeronave.
- Ajuste automático da agulha, ao desenvolver um sistema em malha fechada que cruze os dados de empuxo com a posição da agulha, permitindo encontrar um ponto ótimo de mistura.

Por isso que este projeto será mantido como aberto a todo e qualquer membro da Equipe Keep Flying permitindo uma melhoria constante de suas características e capacidades.

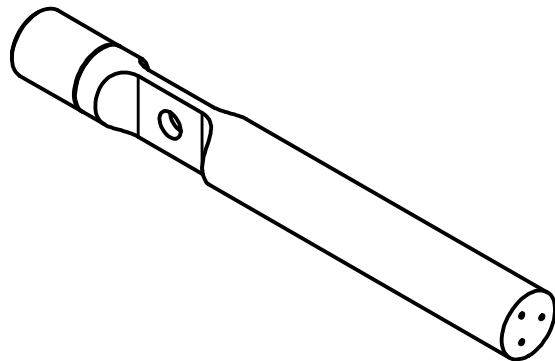
8 REFERÊNCIAS


- (1) EQUIPE KEEP FLYING, *Coletânea de relatórios técnicos*, São Paulo, 2013.
- (2) TROPEA, C., YARIN, A.L., FOSS, J.F., *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Ed. Springer, Berlim, 2007.
- (3) TIMOSHENKO, S., *Theory of Elasticity*, University of Michigan, 1933.
- (4) MARIANI, A.L.C, PADOVEZI, C.D., et al, *Design of an aerodynamic balance*, COBEM 2011, Natal, 2011.
- (5) ICAO, *Manual of the ICAO Standard Atmosphere: extended to 80 kilometres*, 3a ed, 1993.
- (6) MURRAY, F. W. *On the Computation of Saturation Vapor Pressure. Journal Of Applied Meteorology*. Santa Monica, CA, p. 203-204. fev. 1967.
- (7) SAATY, T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, New York, USA, Ed. McGraw-Hill, 1980.
- (8) VINER BRASIL TECNOLOGIA, *Ligas Especiais de Alumínio 7075/7050*, Disponível em: <<http://www.vbtec.com.br/site/index.php/produtos/ligas-especiais-de-aluminio/7075-7050.html>>. Acesso em: 02 dez. 2013.
- (9) YOUNG, W.C., BUDYNAS, R.C., *Roark's Formulas for Stress and Strain*, 7th Edition, Ed. McGraw-Hill, New York, USA, 2002.
- (10) HOTTINGER, BALDWIN, MESSTECHNIK. *HBM Strain Gauges Catalog*, Darmstadt, Deutschland, 2013.
- (11) TEXAS INSTRUMENT, *Instrumentation Amplifier INA125 Datasheet*, Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2013.
- (12) TAMAI, E. H, et al, *PME2451 Medição de Grandezas Mecânicas – Aulas de Laboratório*, Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2013.
- (13) BLEVINS, R.D., *Flow Induced Vibrations*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, USA, 1990.

Apêndice I – Desenhos de Fabricação

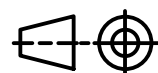



Isométrica (1 : 5)



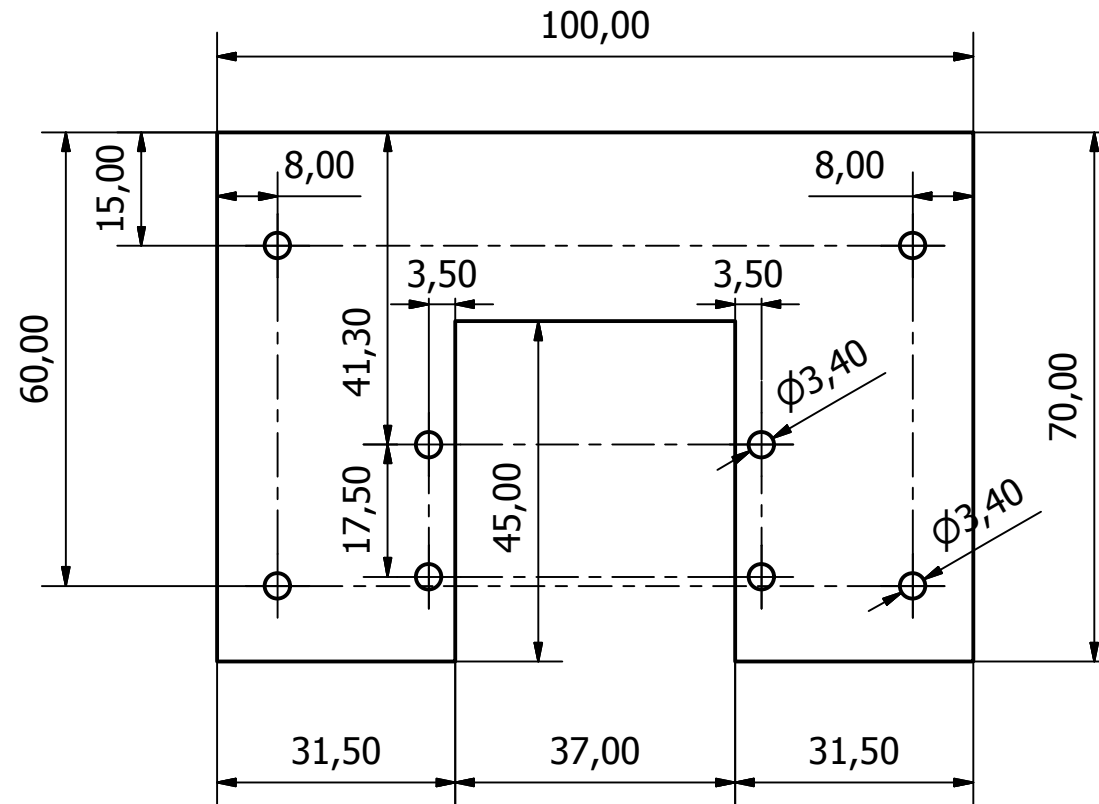
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		20/10/2014
Unidade: mm	Balança Al 7075-T651	
Escala: 1:2		
	Nome: Arthur Lazzarini	NUSP: 7208863


Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		16/04/2014
Unidade: mm	<div style="text-align: center;"> <h1>Flange</h1> <h2>Al 5052</h2> </div>	
Escala: 1:1		
	Nome: Arthur Lazzarini	NUSP: 7208863



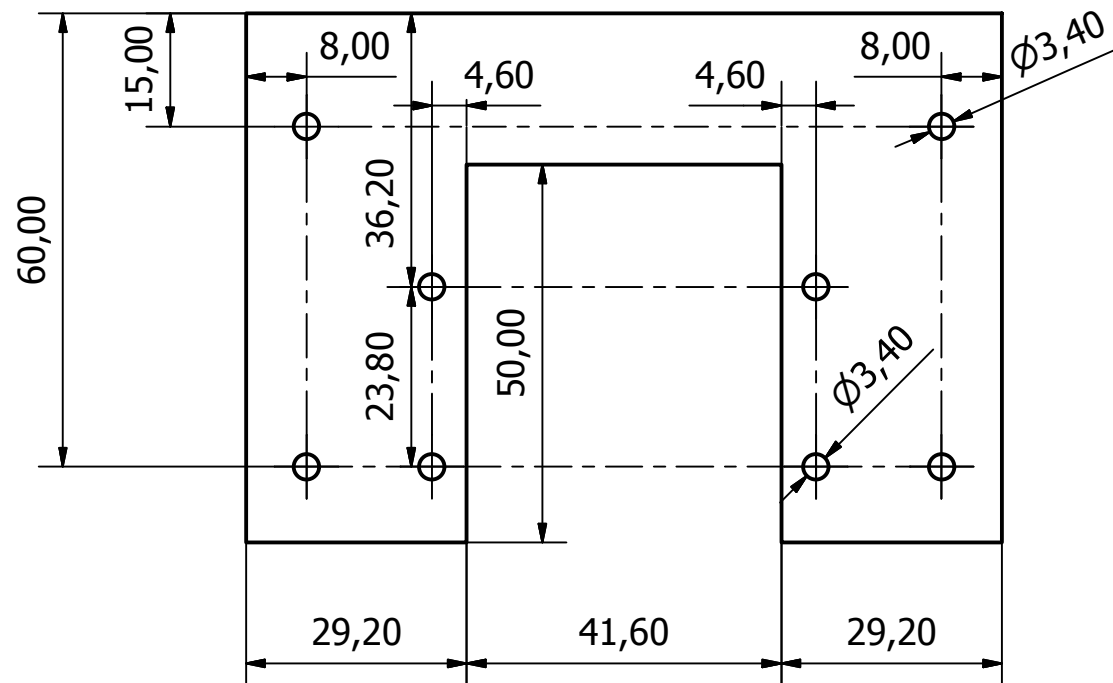
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		19/05/2014
Unidade: mm	<div>Peça 1</div> <div>Suporte Universal</div> <div>(11) 99390-0221</div>	
Escala: 1:1		
	Nome: Arthur Lazzarini	NUSP: 7208863


*!
*!
*!



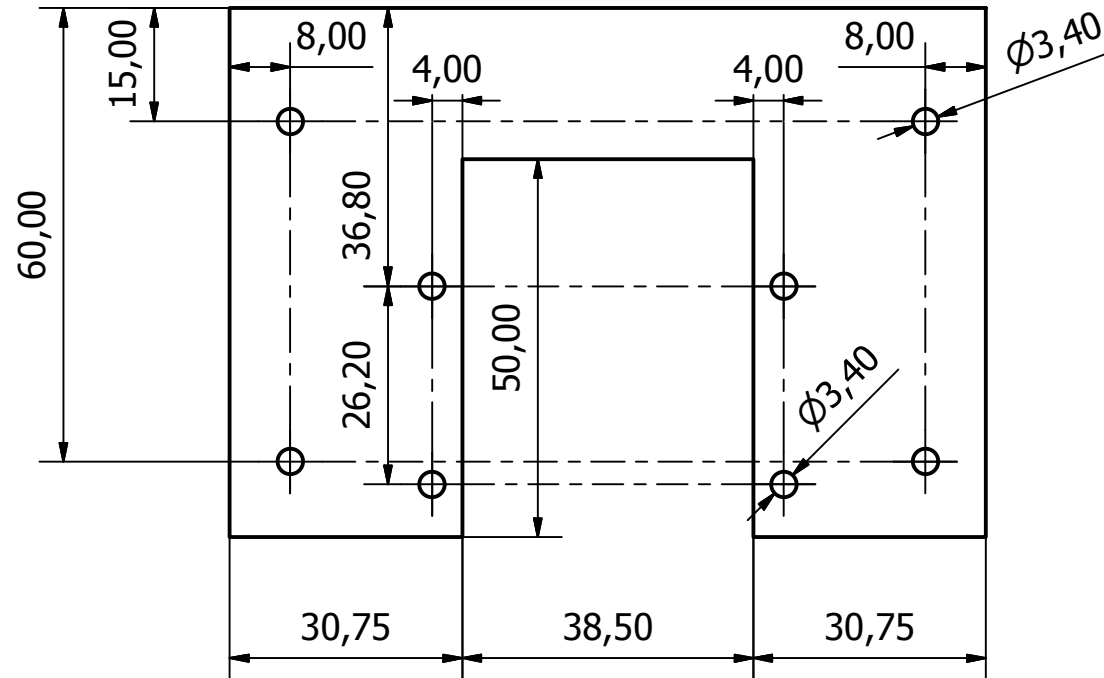
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		19/05/2014
Unidade: mm	<div>Peça 2</div> <div>Suporte OS 55</div> <div>(11) 99390-0221</div>	
Escala: 1:1		
	Nome: Arthur Lazzarini	NUSP: 7208863

! As medidas foram tiradas de desenhos divulgados *!*
 ! pelos fabricantes dos motores, verificar se o modelo *!*
 ! real "encaixa" nos furos riscados antes de fazê-los *!*




Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		19/05/2014
Unidade: mm	Peça 3 Suporte Magnum 61 (11) 99390-0221	
Escala: 1:1		
	Nome: Arthur Lazzarini	NUSP: 7208863

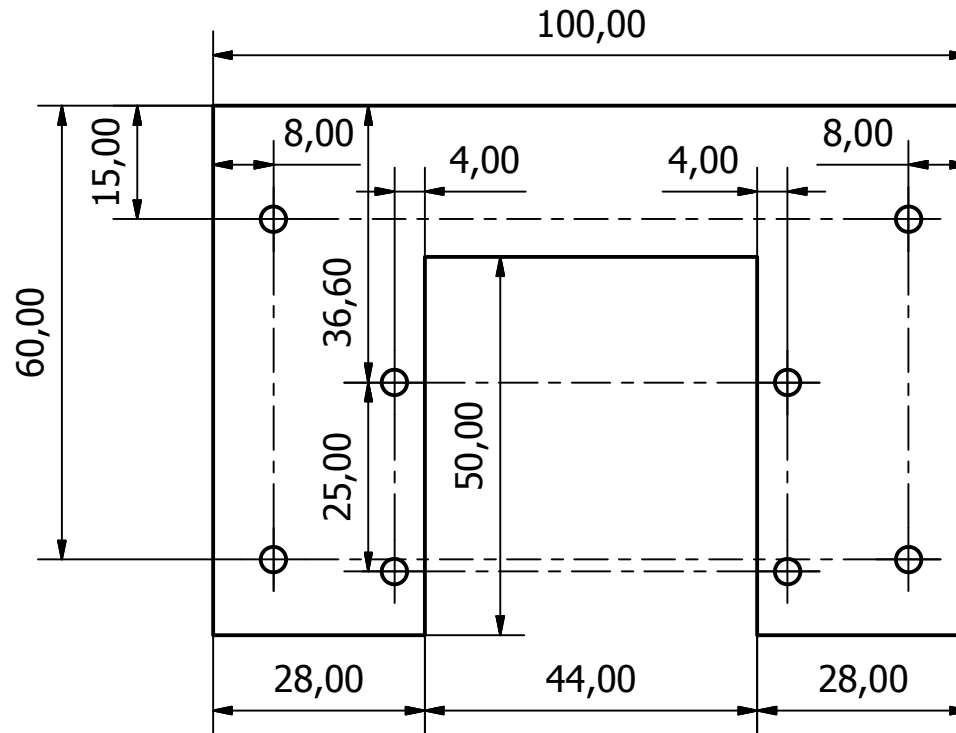
! As medidas foram tiradas de desenhos divulgados *!*
 ! pelos fabricantes dos motores, verificar se o modelo *!*
 ! real "encaixa" nos furos riscados antes de fazê-los *!*




(!) Não é necessária a precisão de 0,05 mm, basta que o
 (!) espaço seja suficiente para encaixar o motor a fixá-lo
 (!) por parafusos de tal maneira que fique centralizado.


Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		19/05/2014
Unidade: mm	Peça 4 Suporte K&B	
Escala: 1:1		
	Nome: Arthur Lazzarini	(11) 99390-0221 NUSP: 7208863

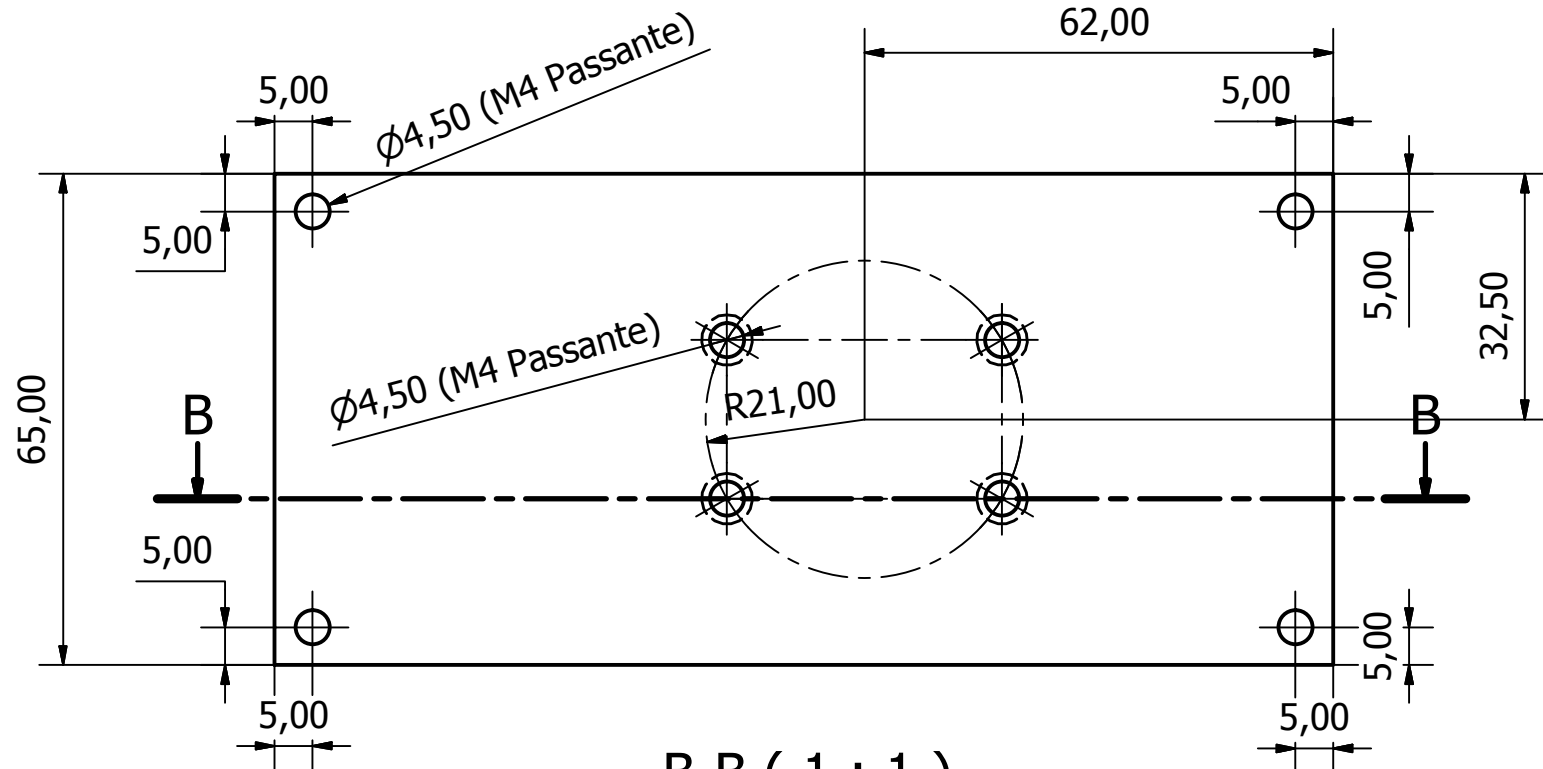
! As medidas foram tiradas de desenhos divulgados *!*
 ! pelos fabricantes dos motores, verificar se o modelo *!*
 ! real "encaixa" nos furos riscados antes de fazê-los *!*



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		19/05/2014
Unidade: mm	Peça 5 Suporte OS 61	
Escala: 1:1		
	Nome: Arthur Lazzarini	(11) 99390-0221 NUSP: 7208863



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		30/06/2014
Unidade: mm	<div style="text-align: center;"> <h1>Tampo da Mesa</h1> </div>	
Escala: 1:5		
	Nome: Arthur Lazzarini	NUSP: 7208863



B-B (1 : 1)

Se necessário pode-se usar o flange já usinado para efetuar a marcação dos furos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

17/08/2014

Unidade: mm

Escala: 1:1

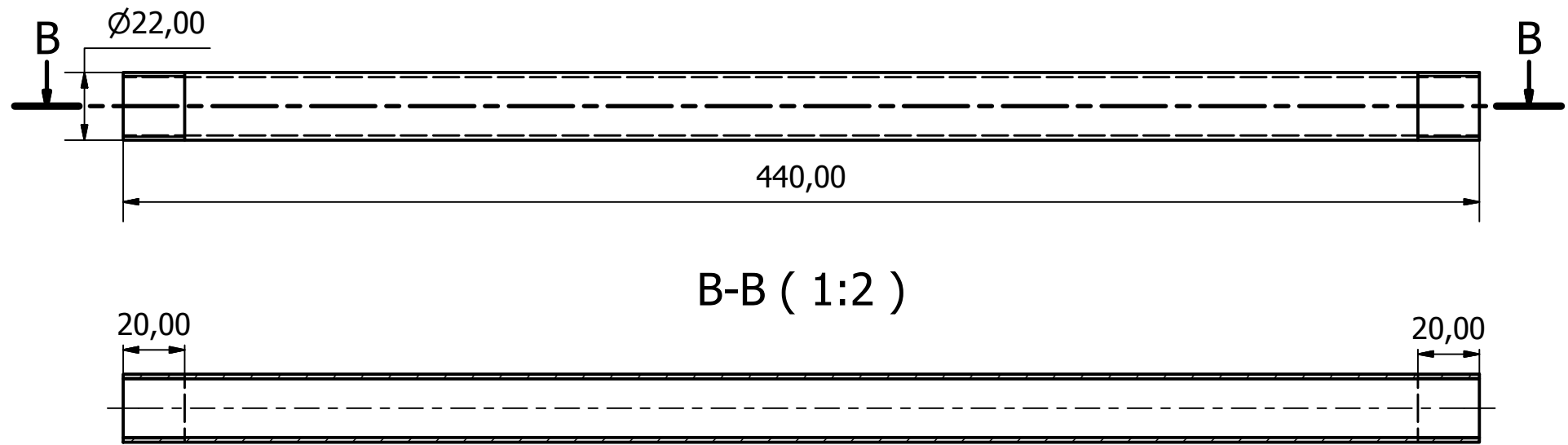
Chapa Base do Tanque

(11) 99390-0221




Nome: Arthur Lazzarini

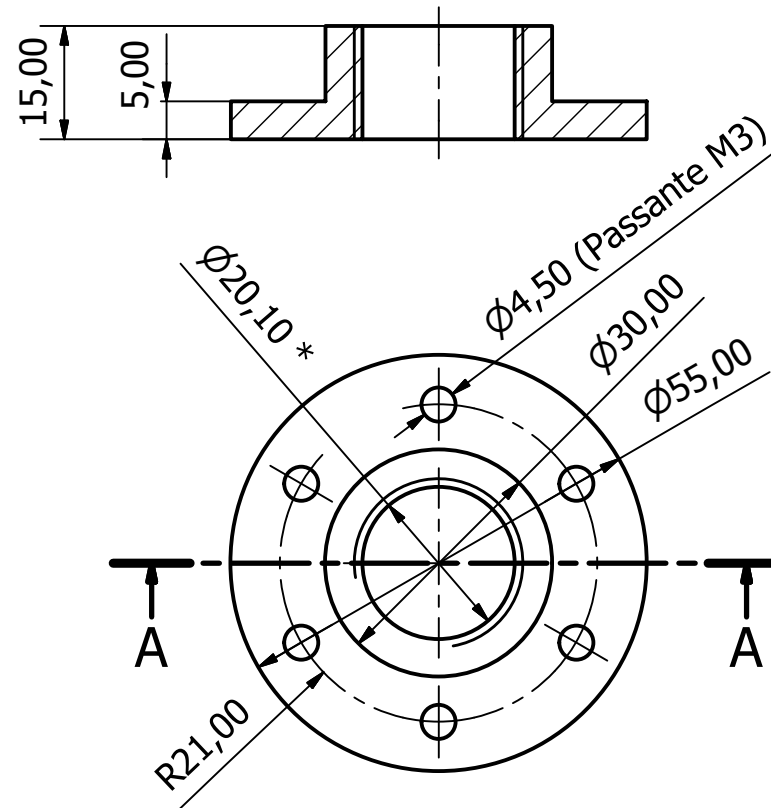
NUSP: 7208863




A rosca nas duas pontas do tubo deve ser compatível com a da base (Suporte do Tanque)

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		30/06/2014
Unidade: mm	Tubo do Tanque	
Escala: 1:2		
	Nome: Arthur Lazzarini	(11) 99390-0221 NUSP: 7208863

A-A (1 : 1)

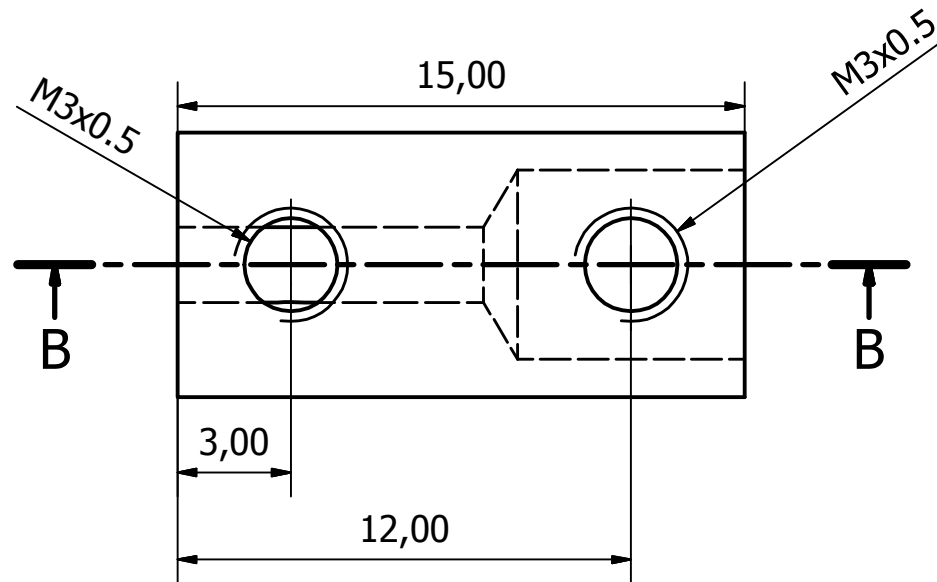
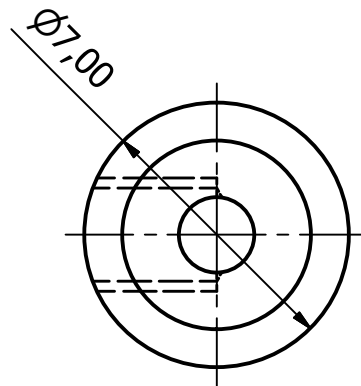
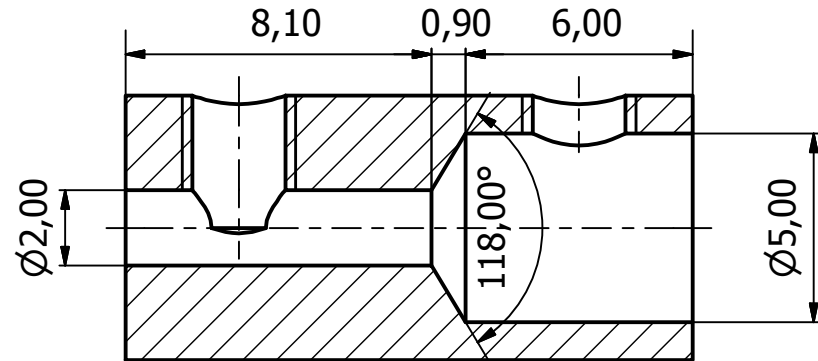


* Furo roscado compatível com a rosca do tubo de alumínio

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo		30/06/2014
Unidade: mm	Suporte do Tanque (Base) 2 unidades (11) 99390-0221	
Escala: 1:1		
	Nome: Arthur Lazzarini	NUSP: 7208863

Verificar se a rosca M3x0.5 é compatível com o restante dos parafusos M3 da bancada antes de usar o macho.

B-B (5 : 1)



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

20/10/2014

Unidade: mm

Suporte do Chicote

Escala: 5:1

Al 6061 (comum)

(11) 99390-0221



Nome: Arthur Lazzarini

NUSP: 7208863