



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Paulo Augusto Pessoa de Souza

**Instrumentação de uma balança aerodinâmica
de três componentes para um túnel de vento
do tipo sopra**

João Pessoa/PB

2017

Paulo Augusto Pessoa de Souza

INSTRUMENTAÇÃO DE UMA BALANÇA AERODINÂMICA DE TRÊS
COMPONENTES PARA UM TÚNEL DE VENTO DO TIPO SOPRO

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal da Paraíba.**

Orientador: Cícero da Rocha Souto

Coorientador: Angelo Emiliavaca

João Pessoa/PB

2017

Paulo Augusto Pessoa de Souza

INSTRUMENTAÇÃO DE UMA BALANÇA AERODINÂMICA DE TRÊS COMPONENTES PARA UM TÚNEL
DE VENTO DO TIPO SOPRO

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso
de Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal da Paraíba.**

Apresentado a banca examinadora em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cicero da Rocha Souto (Orientador)

Universidade Federal da Paraíba

Prof. Me. Angelo Emiliavaca (Coorientador)

Centro Universitário do Vale do Ipojuca

Prof. Dr. Alexsandro José Virginio dos Santos (Examinador interno)

Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Simplício Arnaud da Silva (Examinador interno)

Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa/PB

2017.

”Não pare, prepare-se!

Não ceda, exceda!

Não se desespere, supere-se!

Não desista, resista!

Não provoque, prove! ”.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me proporcionado tudo que precisava e me dado forças para realização desse trabalho.

Aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional e paciência que sempre tiveram comigo.

À minha namorada, pelo companheirismo, suporte e incentivo dados em todos os momentos.

Ao Professor Cícero da Rocha Souto, pelos ensinamentos que proporcionaram a realização deste trabalho, pelo apoio e exemplo admirável.

Ao Professor Ronildo Inácio Soares de Alencar por disponibilizar a balança aerodinâmica e o laboratório de hidráulica.

Aos meus amigos e companheiros do laboratório LaSEA, pelo apoio e suporte teórico dado.

Aos meus demais familiares e amigos, que de forma indireta contribuíram para esta realização em minha vida.

Muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho consiste na reabilitação de uma balança eletrônica de três componentes, modernização de seu sistema de medição de forças e criação de um sistema de aquisição de dados de baixo custo. Este novo sistema de medição é composto por 3 pontes de wheatstone no formato ponte completa o qual contém 4 extensômetros cada, do modelo PA-06-250BA-120LEN, estes os responsáveis por definirem os valores das forças de arrasto e sustentação. O sistema de aquisição é composto por uma plataforma de prototipagem *Arduino* Mega, a qual através de módulos conversores HX711 adquire os sinais analógicos dos extensômetros e os condicionam e convertem para sinais digitais. A interface deste sistema é constituída por um display LCD de 2,4" que mostrará toda informação analisada em tempo real e possibilitará observar se os dados estão sendo armazenados no cartão de memória. Primeiramente, foi realizado um estudo sobre qual plataforma seria adequada para se fazer a aquisição de dados, levando-se em conta vários fatores tais como custo benefício, taxa de amostragem, tamanho, frequência do processador e quantidade de canais. As seguintes etapas foram constituídas por: fixação dos extensômetros nas vigas mono engastadas no processo de sensoriamento da balança; construção do sistema de aquisição de dados e da interface com usuário; calibração das pontes de wheatstone; montagem de todo sistema em conjunto com a balança e pôr fim a comparação entre as forças obtidas experimentalmente com os valores teóricos dos corpos de estudo, ficando comprovado assim a eficiência do sistema com base na veracidade dos dados adquiridos.

Palavras-Chave: Balança aerodinâmica, Instrumentação eletrônica, Sistema de aquisição, Extensometria, *Arduino*.

Lista de Figuras

Capítulo 2

Figura 2-1 (a) Forças de cisalhamento e pressão (b) Componentes de arrasto e sustentação	15
Figura 2-2 Coeficiente de arrasto médio para cilindro e esfera lisa.....	17
Figura 2-3 Características do modelo de perfil NACA 0012 (a) gráfico $CL_{x\alpha}$ e (b) gráfico $CD_{x\alpha}$	18
Figura 2-4 Túnel de vento circuito aberto	19
Figura 2-5 Túnel de vento circuito fechado	19
Figura 2-6 Balança aerodinâmica do tipo <i>Sting</i>	21
Figura 2-7 Balança aerodinâmica externa de 3 componentes	22
Figura 2-8 Curva de tensão <i>versus</i> deformação	24
Figura 2-9 Efeito de Poisson sobre um corpo	25
Figura 2-10 Diagrama de funcionamento do extensômetro	26
Figura 2-11 Extensômetro de resistência elétrica	27
Figura 2-12 Diagrama de funcionamento de um transdutor extensométrico	28
Figura 2-13 Configurações de ponte de wheatstone (a) Um extensômetro ativo (um quarto de ponte) (b) Dois extensômetros ativos (meia ponte).....	29
Figura 2-14 Lâmina engastada com um quarto de ponte.....	30
Figura 2-15 Viga engastada com ponte completa.....	31

Capítulo 3

Figura 3-1 Diagrama de blocos do projeto	32
Figura 3-2 Balança aerodinâmica de 3 componentes	34
Figura 3-3 Pontes completas sobre as molas de sustentação anterior e posterior ...	35
Figura 3-4 Ponte completa sobre a mola de arrasto	35
Figura 3-5 Módulo conversor A/D HX711	37
Figura 3-6 Diagrama de blocos do esquema de ligação do HX711	38
Figura 3-7 Placa de desenvolvimento <i>Arduino Mega 2560</i>	39
Figura 3-8 Display 2,4" TFT LCD touch screen.....	40
Figura 3-9 Layout da placa de circuito impresso	42
Figura 3-10 Modelo 3D da placa de circuito impresso	42

Figura 3-11 Frente do dispositivo de aquisição de dados montado	43
Figura 3-12 Parte de trás do dispositivo de aquisição de dados montado	43
Figura 3-13 Dispositivo de aquisição de dados finalizado e em funcionamento	44
Figura 3-14 Estrutura de calibração	45
Figura 3-15 Túnel de vento do tipo sopra.....	46
Figura 3-16 Sistema montado no túnel de vento.....	47

Capítulo 4

Figura 4-1 Curva de calibração da célula de carga da sustentação anterior.....	49
Figura 4-2 Curva de calibração da célula de carga da sustentação posterior	50
Figura 4-3 Curva de calibração da célula de carga do arrasto	51
Figura 4-4 Cilindro padrão montado na seção de teste.....	53
Figura 4-5 Perfil NACA 0012 montado na seção de teste	54
Figura 4-6 Curva $CL \times \alpha$	57
Figura 4-7 Curva $CD \times \alpha$	57

Manual de uso

Figura 1. Funções do sistema de aquisição	71
Figura 2. Inserção do cartão de memória.....	72
Figura 3. Erro por falta de cartão SD.....	72
Figura 4. Conexão da balança ao sistema de aquisição de dados	73
Figura 5. Iniciando o sistema.....	73
Figura 6. Pressionar o botão até a luz acender, para salvar os dados.....	74

Lista de abreviaturas e siglas

LH	Laboratório de hidráulica
UFPB	Universidade federal da Paraíba
CL	Coeficiente de sustentação
CD	Coeficiente de arrasto
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PCI	Placa de circuito impresso

Lista de Tabelas

Capítulo 3

Tabela 3-1 Principais características <i>Arduino Mega 2560</i>	39
Tabela 3-2 Especificações técnicas display LCD	40

Capítulo 4

Tabela 4-1 Dados da curva de calibração da célula de carga da sustentação anterior	49
Tabela 4-2 Dados da curva de calibração da célula de carga da sustentação posterior	50
Tabela 4-3 Dados da curva de calibração da célula de carga do arrasto.....	51
Tabela 4-4 Funções de transferências	52
Tabela 4-5 Sensibilidade da função de transferência.....	52
Tabela 4-6 Dados do experimento com o NACA 0012.....	55
Tabela 4-7 Valores teóricos das características do NACA 0012	56

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	12
Capítulo 2 – Revisão bibliográfica	14
2.1. Aerodinâmica	14
2.1.1 Forças de arrasto e sustentação	14
2.1.2 Túnel de vento e balança aerodinâmica.....	18
2.1.2.1 Túnel de vento.....	18
2.1.2.2 Balança aerodinâmica.....	20
2.2. Instrumentação	23
2.2.1 Extensometria	23
2.2.2 Célula de carga e ponte de wheatstone	27
Capítulo 3 – Metodologia experimental	32
3.1. Instrumentação da balança de três componentes.....	33
3.2. Sistema de condicionamento e aquisição de dados	36
3.2.1. Condicionamento do sinal	37
3.2.2. Aquisição e armazenamento de dados	38
3.3. Montagem do sistema.....	41
3.4. Calibração estática	44
3.5. Validação do sistema.....	46
Capítulo 4 – Resultados e discussões	48
4.1. Calibração estática.....	48
4.2. Testes em túnel de vento com modelos padrão.....	52
Capítulo 5 – Conclusões	59
Referências bibliográficas	60
Anexos	62
Anexo I – Código utilizado para programar o Arduino	62
Anexo II – Manual de uso do dispositivo de aquisição de dados.....	67

Capítulo 1 - Introdução

Uma das ferramentas mais eficientes no estudo da aerodinâmica são os túneis de vento, os quais são bastante utilizados em pesquisas que envolvam o movimento do ar sobre perfis aerodinâmicos ou sobre protótipos de aeronaves, automóveis e até mesmo de projetos arquitetônicos na construção civil. Os túneis de vento são classificados em função da velocidade que podem atingir, resumindo-se em: subsônico (abaixo da velocidade do som), supersônicos (acima da velocidade do som) ou hipersônicos (5 vezes maior do que a velocidade do som). Eles são divididos em duas configurações básicas que representam o seu aspecto físico: circuito aberto e circuito fechado. As forças de sustentação e arrasto são obtidas através do estudo do fluido gasoso que escoar sobre o corpo em análise no túnel de vento com o auxílio da balança aerodinâmica (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

A balança aerodinâmica é um dispositivo que em conjunto com um sistema de medição, que pode ou não conter um sistema de aquisição de dados, auxilia na obtenção experimental das forças aerodinâmicas aplicadas sobre os corpos em estudo. Este dispositivo usualmente é composto por molas ou células de cargas que são os elementos sensores responsáveis pela medição dos esforços aplicados. As forças aerodinâmicas podem ser analisadas em tempo real através de uma interface computacional ou instrumentos de medição como relógios comparadores, micrômetros, lvdt, entre outros (SOETHE et al., 2011).

A balança aerodinâmica de três componentes comercializada pela empresa inglesa *Plint & Partnes* possui um sistema de medição baseado na deflexão estática de molas onde são acopladas fitas sob tração proporcional as forças aerodinâmicas sobre o modelo. Na sua versão original a deflexão estática era medida através micrômetros e relógios comparadores, fornecendo uma medida indireta das forças.

O Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal da Paraíba (LH/DECA/CT/UFPB), dispõe deste equipamento, no entanto, o mesmo estava em desuso devido a danos causados pela ação de intempéries sobre a estrutura mecânica da balança assim como a perda da calibração dos instrumentos acoplados.

Além dos problemas já citados, o sistema de medição original gerava uma série de inconvenientes como: falta de sincronismo entre os dados, erros de paralaxe do observador no momento de leitura, além de outras limitações físicas. A partir desta série de inconvenientes listados houve a necessidade de revitalização da balança aerodinâmica e de um retrofiting de seu sistema de medição, o que resultou este trabalho.

Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo a instrumentalização de uma balança de três componentes através da extensometria e o desenvolvimento de um sistema de aquisição de baixo custo para visualização e armazenamento de dados adquiridos durante os ensaios.

Foi feito um levantamento dos tipos de instrumentação aplicados a este tipo equipamento para selecionar o mais adequado ao sistema disponível no LH, também foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados com interface amigável e intuitiva para os usuários, e, por fim, foi feita a aferição com base em dados experimentais e teóricos de modelos disponíveis pelo fabricante para validação do sistema de medição.

Ao fim deste trabalho foi apresentado como produto uma balança aerodinâmica devidamente instrumentada com um sistema de aquisição de dados dedicado e de fácil utilização como parte de sua revitalização.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica

Este capítulo contém uma revisão dos conceitos fundamentais aplicados durante o trabalho e que necessitam de conhecimento prévio para um bom entendimento do texto, tais como aerodinâmica e instrumentação. Este trabalho abordará temas como forças de arrasto e sustentação, modelos de túnel de vento, balança aerodinâmica, extensometria, ponte de wheatstone e célula de carga.

2.1. Aerodinâmica

A aerodinâmica é a parte da mecânica que estuda o movimento dos fluidos gasosos e as forças que agem sobre os corpos sólidos quando imersos nos fluidos em estudo. As forças de arrasto e sustentação serão temas abordados na próxima seção, assim como túneis de vento e balanças aerodinâmicas, que são ferramentas responsáveis por medir essas forças, serão abordadas na seção seguinte.

2.1.1 Forças de arrasto e sustentação

O escoamento dos fluidos sobre os corpos rígidos produz forças denominadas de arrasto e sustentação, forças essas que se encontram presentes em nosso dia a dia, sejam na sustentação dos aviões ou nas forças geradas por turbinas eólicas. As formas destes corpos tem influência direta nesse escoamento e também no campo de velocidades (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2014) .

O arrasto é a força que um fluido em movimento exerce sobre um corpo na direção do escoamento, se tornando por vezes contrária a direção de movimento de um corpo, em virtude disso as asas de aviões, design de carros, motos e outros veículos são devidamente projetados para que possuam uma baixa força de arrasto e conseqüentemente uma redução significativa do consumo de combustíveis e no nível de ruído. Contudo essa força também produz efeitos benéficos como o auxílio nos freios de automóveis, e também permite que as pessoas possam saltar de paraquedas (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

A sustentação é a soma das componentes da pressão e forças de cisalhamento na direção normal ao escoamento que tendem a mover o corpo nessa direção. Essa força de sustentação é a responsável por fazer o avião voar e por manter os carros de corrida próximos ao chão, aumentando a tração e o controle através da sustentação negativa (RODRIGUES, 2013).

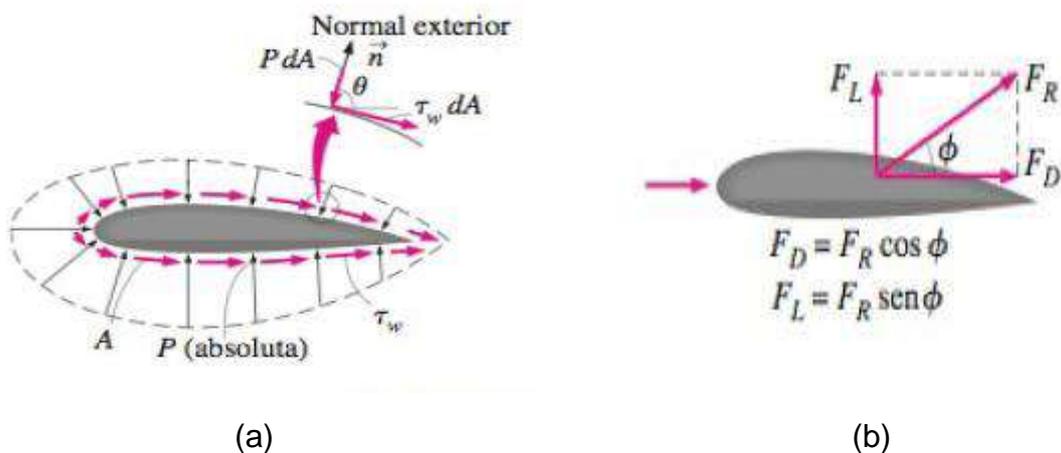
A pressão e a força de cisalhamento sobre um corpo rígido imerso a um fluido produzem componentes na direção do escoamento e na direção normal ao escoamento, denominados de força de arrasto e força de sustentação respectivamente (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). As forças de pressão representada por PdA e cisalhamento por $T_W dA$ sobre uma área infinitesimal dA na superfície do corpo solido podem ser vistos na figura 2-1(a). As componentes derivadas dessas forças: F_D e F_L são as forças de arrasto e de sustentação respectivamente observadas na figura 2-1(b) e são representadas por:

$$F_D = \int_A (-P \cos \theta + T_W \sin \theta) dA \quad (1)$$

e

$$F_L = - \int_A (P \sin \theta + T_W \cos \theta) dA \quad (2)$$

Figura 2-1 (a) Forças de cisalhamento e pressão (b) Componentes de arrasto e sustentação



Fonte: (ÇENGEL; CIMBALA, 2007)

Números adimensionais que representam as características do arrasto e sustentação são denominados de coeficientes de arrasto e sustentação e são definidos respectivamente por:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (4)$$

Onde:

C_D : Coeficiente de arrasto

C_L : Coeficiente de sustentação

ρ : Densidade do fluido

V : Velocidade a montante

A : Área frontal

Para o cálculo dos coeficientes de arrasto e sustentação para uma superfície inteira são necessários os coeficientes médios definidos por:

$$C_D = \frac{1}{L} \int_0^L C_{D,x} dx \quad (5)$$

$$C_L = \frac{1}{L} \int_0^L C_{L,x} dx \quad (6)$$

O coeficiente de arrasto depende do número de Reynolds, principalmente para números de Reynolds abaixo de 10^4 , para os números mais altos, os coeficientes tendem a permanecer constantes (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Os coeficientes de arrasto para as formas geométricas de seção constante são tabelados segundo a tabela 10 da NBR 6123 que trata das forças devido ao vento em edificações (ABNT, 1988). Em corpos de geometria esférica ou de geometria cilíndricas lisos há uma relação entre o número de Reynolds (7) com o coeficiente de arrasto que se dá pelas curvas da figura 2-2.

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (7)$$

Onde:

D : Diâmetro do cilindro ou esfera

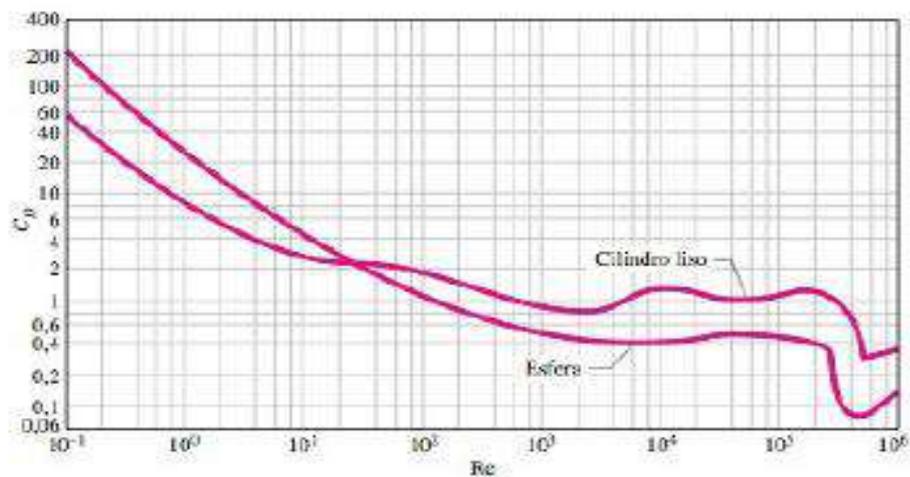
ν : Viscosidade cinemática

ρ : Densidade do fluido

V : Velocidade a montante

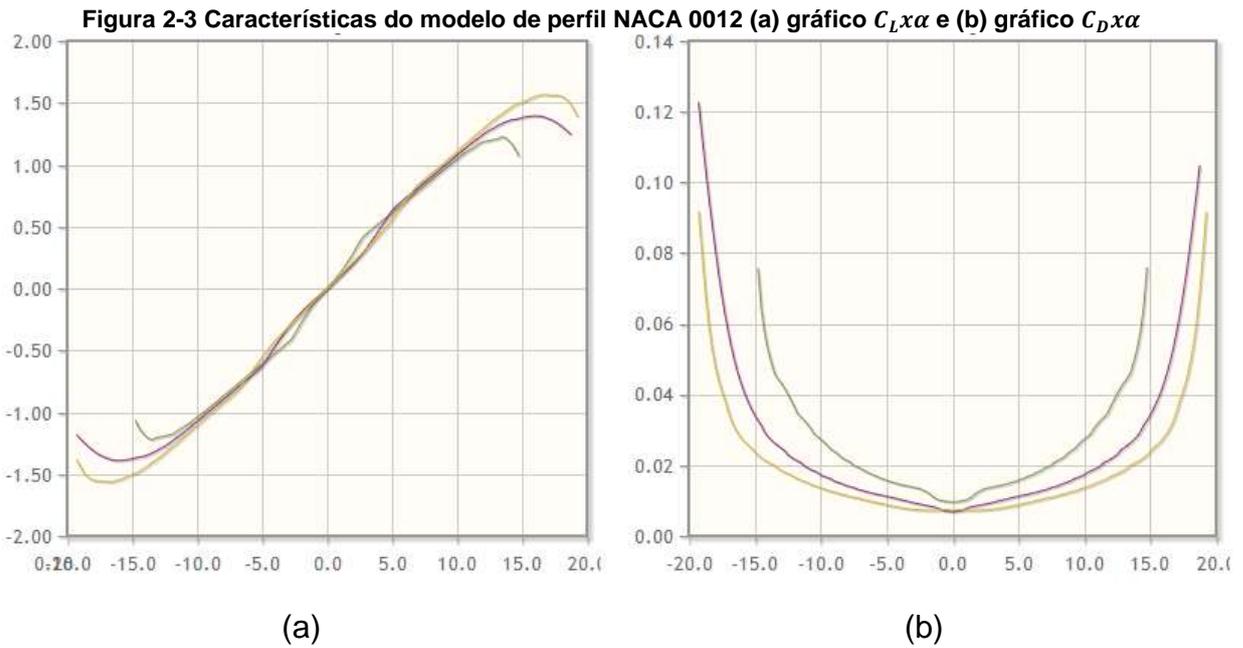
μ : Viscosidade dinâmica

Figura 2-2 Coeficiente de arrasto médio para cilindro e esfera lisa



Fonte: (SCHLICHTING; GERSTEN, 1979)

As variações dos coeficientes de sustentação e arrasto para aerofólios foram estudadas pela NACA que produziu diversas listas de dados que relacionam os coeficientes de sustentação e arrasto para diferentes ângulos de ataques em diferentes números de Reynolds. A figura 2-3(a) e figura 2-3(b) representam as características do modelo de aerofólio perfil NACA 0012 para ângulos de ataque entre -20° a 20° e números de Reynolds entre 2×10^5 a 10^6 .



Fonte: ("Naca 0012 characteristics", 2017)

2.1.2 Túnel de vento e balança aerodinâmica

2.1.2.1 Túnel de vento

Como já citado os túneis de vento são uma das ferramentas mais eficientes no estudo da aerodinâmica e possuem a finalidade de simular os efeitos do escoamento de fluídos sobre modelos em escala. Através dessas simulações são adquiridos dados precisos sobre os comportamentos dos corpos e do fluído, como por exemplo as formas do escoamento do ar e as forças resultantes sobre o corpo. A análise dessas informações permitiu que cientistas e pesquisadores desenvolvessem melhorias aerodinâmicas para os automóveis, aeronaves e turbinas eólicas, assim permitindo trabalharem com máxima eficiência e com perdas mínimas.

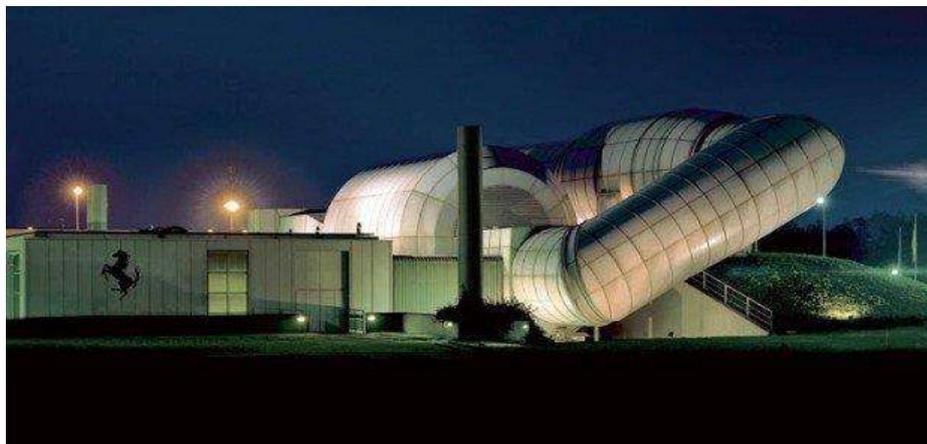
Os túneis de vento como já mencionado podem ser definidos quanto a configuração de seu circuito, podendo ser chamados de circuito aberto ou circuito fechado (COUTINHO, 2014), como podem ser vistos na figura 2-4 e figura 2-5 respectivamente.

Figura 2-4 Túnel de vento circuito aberto



Fonte: (POLITERM, 2017)

Figura 2-5 Túnel de vento circuito fechado



Fonte: (CONTESINI, 2017)

Os túneis de vento de circuito fechado possuem uma passagem de retorno ao qual o fluido circula, podendo ser horizontal ou vertical enquanto nos túneis de vento de circuito aberto não há essa passagem de retorno. Os túneis de vento de circuito aberto são geralmente usados para instrução, possuem um custo de construção mais baixo em relação ao de circuito fechado e podem ser definidos quanto a

direção do fluxo de ar podendo ser do tipo sucção ou do tipo sopro (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

O túnel de vento de circuito aberto é dividido em:

- Tela: Tem o objetivo de fornecer proteção para o ventilador, controle do fluxo no difusor e controle da turbulência.
- Colmeia: Tem a função de corrigir a direção do escoamento.
- Câmara de estabilização: Composta por colmeia e tela.
- Bocal de contração: Converte o fluxo de ar vindo da câmara de estabilização para seção de teste aumentando a velocidade.
- Seção de teste: Área do túnel onde é posicionado o corpo de estudo. Deve possuir paredes que possibilitem a visualização do experimento e que não perturbem o escoamento do fluido.
- Difusores: A função do difusor é converter a energia cinética em energia de pressão, ou seja, reduzir a velocidade com o mínimo de perdas e conseqüentemente ter uma máxima recuperação de pressão e por fim evitar dos jatos de ar no local em que o túnel está localizado.
- Ventilador: Atende à demanda do sistema podendo ser do tipo centrífugo ou do tipo axial.

2.1.2.2 Balança aerodinâmica

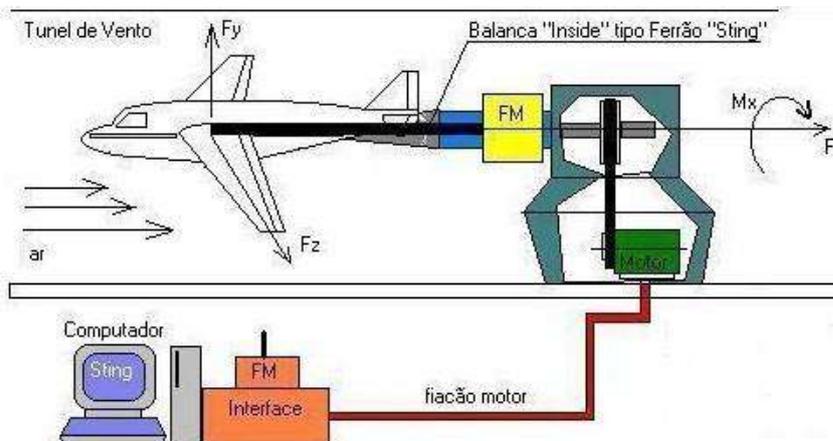
Para o cálculo das forças de arrasto e sustentação sobre um corpo em um túnel de vento, é necessário um dispositivo que quantifique os valores dessas forças de uma maneira precisa e eficiente, a balança aerodinâmica é o dispositivo que acoplado ao túnel de vento é responsável por esta ação.

As forças podem ser medidas por métodos mecânicos e/ou eletrônicos, sendo os métodos por sistema de molas e o método de células de cargas os mais comuns. Nestes métodos as forças envolvidas são proporcionais as deformações sofridas pelas molas ou pelas células de carga e com o auxílio de relógios comparadores, extensometria e dispositivos detectores de deslocamento e/ou deformação essas forças são medidas.

Uma das características mais importantes da balança aerodinâmica é a quantidade de componentes de um esforço que podem ser medidos por essa balança, que podem chegar até 6 componentes, são eles: sustentação, arrasto, momento de arfagem, força lateral, momento de guinada e momento de rolagem (ÉGEA; COIMBRA, 2008)

As balanças podem ser classificadas como: Balanças internas ou externas, as balanças internas se encontram dentro de um modelo, podendo ser compostas por dinamômetros, as quais são chamadas de balanças dinamométricas ou podem ser compostas por elementos fletores que são denominadas de balanças aerodinâmicas fletoras. A configuração mais comum é a *Sting*, que pode ser observada na figura 2-6 é composta por uma viga em balanço, presa entre a parede do túnel e o modelo. Uma das vantagens dessa configuração é a baixa influência no escoamento sobre o modelo (ÉGEA; COIMBRA, 2008).

Figura 2-6 Balança aerodinâmica do tipo *Sting*

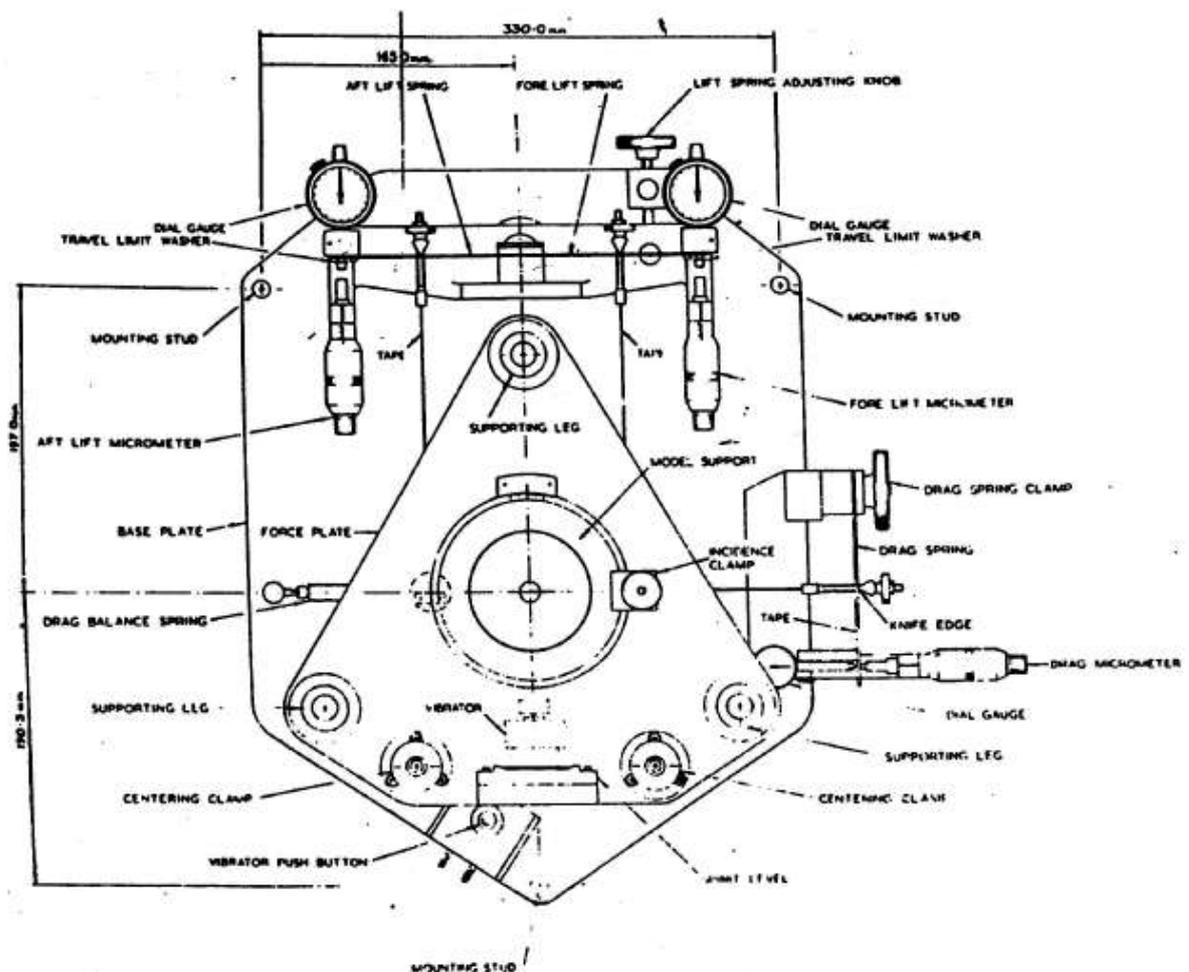


Fonte: Adaptado de (LUPORINI, 1995)

Já as balanças externas são localizadas fora do túnel de vento, são usadas frequentemente com túneis subsônicos e para medir as forças utilizam elementos estruturais que ligam o corpo de estudo a balança aerodinâmica através das paredes do túnel de vento. A figura 2-7 ilustra o método utilizado em uma balança externa, igual a deste estudo através da medição da deflexão estática nas molas utilizando relógios comparadores. As forças de sustentação e arrasto são calculadas mediante as deflexões sofridas pelas molas, essas deflexões são verificadas através

de relógios comparadores e são proporcionais as forças de arrasto e sustentação sofridas pelo corpo de estudo que está conectado a balança por meio de uma estrutura de metal.

Figura 2-7 Balança aerodinâmica externa de 3 componentes



Fonte: (CAVALIERI; SILVA; SILVA, 2015)

O funcionamento das balanças aerodinâmicas em geral obedecem ao mesmo princípio, o corpo de estudo é fixado diretamente a balança aerodinâmica que por sua vez é fixa em relação ao escoamento, seja internamente ou externamente ao túnel de vento. Devido ao escoamento do ar sobre o corpo de estudo surgem forças, que são medidas pelos métodos descritos anteriormente.

2.2. Instrumentação

A instrumentação é uma área de conhecimento formada por vários campos da engenharia que envolve a utilização de sensores e transdutores como instrumentos para determinados fins, sejam eles a medição de uma deformação, de uma temperatura, de um movimento ou até mesmo a velocidade de um objeto (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

A medição das deformações superficiais dos corpos é o objetivo da extensometria, que será o tema abordado na próxima seção.

2.2.1 Extensometria

A extensometria é o método que utiliza a relação Hooke, a qual estabelece uma relação entre tensão e deformação em um corpo, quando houver um esforço mecânico (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). A lei de Hooke define que uma deflexão sofrida por uma mola é dada pela expressão:

$$F = kx \quad (8)$$

Onde:

F : Força

x : Deflexão mecânica

k : Constante de rigidez da mola

A lei de Hooke também pode ser expressa por:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (9)$$

Onde:

σ : Tensão mecânica

ε : Deformação percentual

E : Modulo de Young ou coeficiente de elasticidade

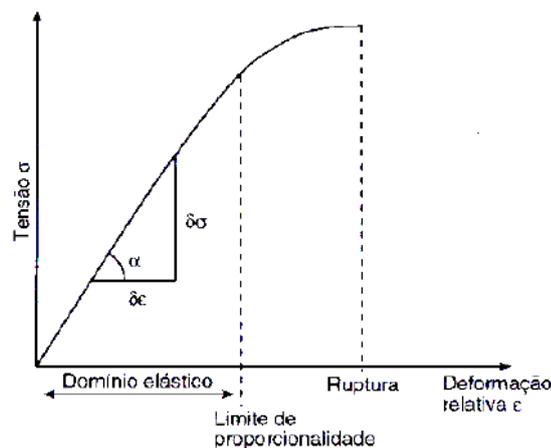
Alguns materiais possuem uma proporcionalidade direta entre tensão e deformação para pequenas variações, figura 2-8, obedecendo a relação de Hooke, porém se a deformação ultrapassar o limite de proporcionalidade, a relação deixa de ser direta podendo vir a ocorrer a ruptura. Vale notar que ao ocorrer uma deformação em um corpo devido a ação de uma força, essa deformação não ocorre apenas na direção da força aplicada (eixo x), ocorre simultaneamente uma deformação na direção dos eixos y e z, figura 2-9, aumentando ou reduzindo a secção(GOMES, 1980).

Segundo (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007), os materiais que possuem uma mesma propriedade mecânica em todas as direções são chamados de materiais isotrópicos, esses materiais possuem uma relação entre deformação longitudinal e transversal denominada de coeficiente de Poisson, que pode ser expressa por:

$$\gamma = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (10)$$

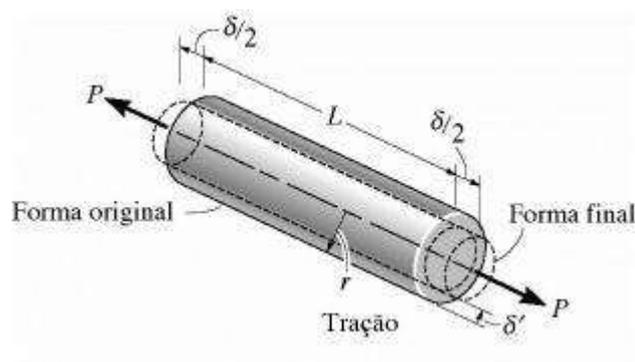
Onde o sinal negativo representa uma redução de dimensão do corpo em que a tensão é aplicada.

Figura 2-8 Curva de tensão versus deformação



Fonte: Adaptado de (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007)

Figura 2-9 Efeito de Poisson sobre um corpo



Fonte: Adaptado de (WEBSTER; PALLÁS-ARENY, 2000)

Com o desenvolvimento da eletrônica e dos sensores, as forças passaram a serem medidas das mais diversas formas possíveis, com uma maior precisão e eficiência. A forma mais popular de medir essas forças é através das células de carga, que são dispositivos eletrônicos capazes de medi-las (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

Existem diversos tipos de dispositivos eletrônicos transdutores de força que são eles: extensômetros de resistência elétrica, com compensação térmica, com semicondutores, resistores sensor de força, transdutores de força capacitivo e transdutores de força piezelétricos. Em 1856, Kelvin relacionou a deformação dos materiais na região elástica a variação de suas resistências elétricas, onde observou que essa relação era uma constante, posteriormente chamada de fator do extensômetro ou fator *Gage* (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007). A relação é descrita como:

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R_o}}{\frac{\Delta l}{l_o}} = \frac{\Delta R}{R_o} \cdot \frac{l_o}{\Delta l} = \frac{\Delta R}{R_o} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \quad (11)$$

Onde:

K: Fator *Gage*

R_o : Resistência inicial

ΔR : Variação de resistência

l_o : Comprimento inicial

Δl : Variação de comprimento

ε : Deformação relativa

O fator *Gage* representa a sensibilidade do extensômetro, o qual define a relação entre o sinal de entrada (deformação do material) e o sinal de saída (variação da resistência elétrica).

Figura 2-10 Diagrama de funcionamento do extensômetro



Fonte: Elaborada pelo autor

Os extensômetros de resistência elétrica, figura 2-11, são baseados na variação da resistência de um condutor elétrico quando sujeito a ação de uma força que o deforme e é composto por uma base de epóxi ou poliamida e uma grade que é formada por uma liga metálica que serve como elemento resistivo (WEBSTER; PALLÁS-ARENY, 2000). Para pequenas variações no extensômetro existe uma relação direta entre deformação e tensão e a resistência de um fio pode ser considerada como:

$$R = R_0 + dR = R_0 \left(1 + \frac{dR}{R_0} \right) \approx R_0(1 + k\varepsilon) = R_0(1 + x) \quad (12)$$

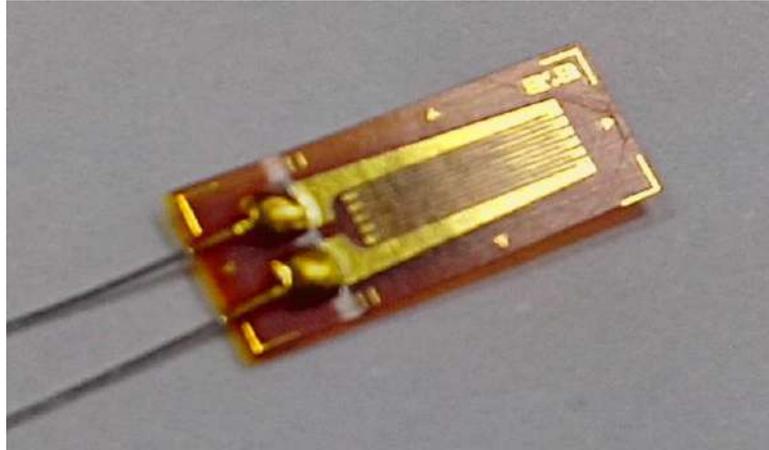
Onde:

K : Fator *Gage*

R_0 : Resistência inicial

x : Variação da resistência causada pela força aplicada

Figura 2-11 Extensômetro de resistência elétrica



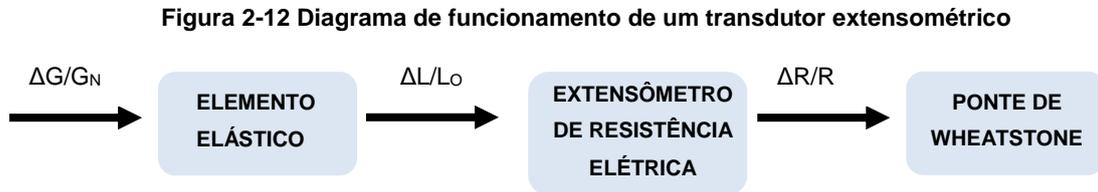
Fonte: (PANTEC, 2017)

Para o uso do extensômetro de resistência elétrica é necessário à sua colagem com uma cola adequada no corpo de estudo para que a deformação seja transmitida integralmente para os fios metálicos da grade ocasionando a variação da resistência elétrica e podendo relacionar a variação relativa de resistência com a deformação relativa do corpo (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007).

2.2.2 Célula de carga e ponte de wheatstone

A célula de carga é o transdutor responsável por medir forças onde um extensômetro é colado a um corpo de forma que ambos estejam submetidos a uma mesma tensão mecânica e conseqüentemente a mesma deformação, onde a saída do sinal mostrará uma variação de resistência que é ligada a uma configuração de circuito eletrônico chamado de ponte de wheatstone. Essa configuração possibilita a obtenção de um sinal proporcional a força mecânica aplicada com o auxílio de um amplificador de sinal. A transdução começa quando a célula de carga sofre uma solicitação mecânica ($\Delta G/G_N$), ocasionando uma deformação ($\Delta l/l_0$) no elemento elástico, provocando uma variação da resistência inicial ($\Delta R/R$) nos extensômetros. Essas variações de resistência provocarão um desbalanço nos terminais da ponte de wheatstone que é excitada por uma tensão V_i (BALBINOT; BRUSAMARELLO,

2007). A figura 2-12 mostra um diagrama com as etapas de funcionamento do transdutor extensométrico.



Fonte: Elaborado pelo autor

A sensibilidade da célula de carga é influenciada pela posição dos extensômetros e pela configuração da ponte de wheatstone. Existem diversas configurações de pontes que são caracterizadas pela quantidade e posição dos extensômetros, algumas destas configurações podem ser vistas na figura 2-13. O cálculo da tensão de saída do circuito que é composto por resistores R e um único extensômetro da figura 2-13(a) é dado por:

$$E_o = \frac{E}{2} - \frac{E(R \pm \Delta R)}{R + R \pm \Delta R} \quad (13)$$

Onde pode ser simplificada para:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{\pm \Delta R}{4R \pm 2\Delta R} \quad (14)$$

Dividindo numerador e denominador por R e sabendo que $K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$, temos:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{\pm K\varepsilon}{4 \pm 2K\varepsilon} \quad (15)$$

A relação de tensão é dada por V/V, multiplica-se o numerador por 1000 para que a relação seja dada por mV/V, porém para que ε tenha unidade de $\mu\text{m/m}$ é necessário um fator de $\times 10^{-6}$, com isso temos:

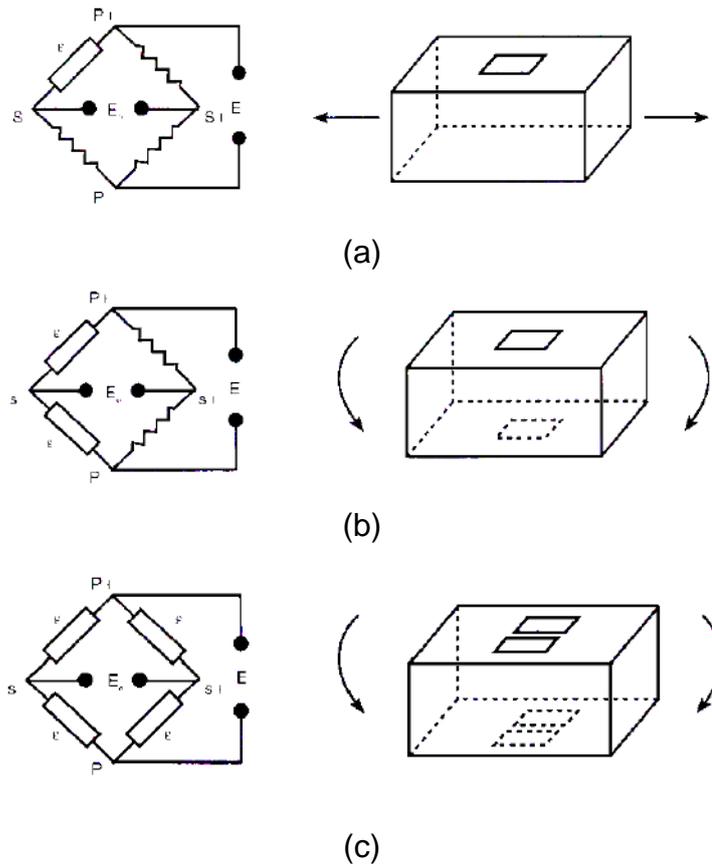
$$\frac{E_o}{E} = \frac{\pm K\varepsilon \times 10^{-3}}{4 \pm 2K\varepsilon \times 10^{-6}} \text{ [mV/V]} \quad (16)$$

Da mesma forma para a figura 2-13(b) e figura 2-13(c) temos respectivamente:

$$\frac{E_O}{E} = \frac{K\varepsilon \times 10^{-3}}{2} \text{ [mV/V]} \quad (17)$$

$$\frac{E_O}{E} = K\varepsilon \times 10^{-3} \text{ [mV/V]} \quad (18)$$

Figura 2-13 Configurações de ponte de wheatstone (a) Um extensômetro ativo (um quarto de ponte) (b) Dois extensômetros ativos (meia ponte) (c) Quatro extensômetros ativos (ponte completa)



Fonte: (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007)

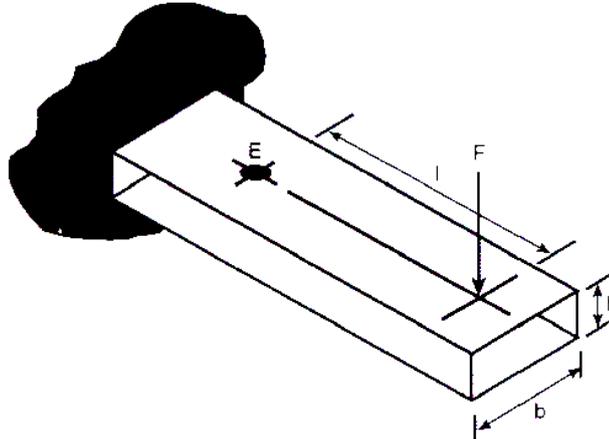
Existem diversos tipos e formas de células de cargas, entre elas as do tipo coluna, lâmina engastada, tipo anel e duas vigas biengastadas. As células de cargas do tipo lâmina engastada podem ser vistas na figura 2-14. Se um momento fletor é aplicado a extremidade de uma lâmina engastada, irá provocar uma tensão σ e o momento de inércia será:

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{h/2} \text{ e } I = \frac{bh^3}{12} \quad (19)$$

Onde $h/2$ é a distância até o centro e tem-se:

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} \quad (20)$$

Figura 2-14 Lâmina engastada com um quarto de ponte



Fonte: (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007)

Como não há nenhuma força externa e só há deformação longitudinal, temos:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0 \text{ e } \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \quad (21)$$

A uma distância l do ponto da força aplicada temos:

$$M = Fl \therefore \sigma = \frac{6l}{bh^2} F \text{ e } \varepsilon_1 = \frac{6l}{bh^2 E} F \quad (22)$$

E a sensibilidade para célula de carga para uma lâmina engastada com 1 extensômetro é:

$$S_{axial} = \frac{6l}{bh^2 E} \quad (23)$$

Caso a célula de carga seja composta por uma ponte completa, figura 2-15, teremos:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \frac{6l}{bh^2 E} F \quad (24)$$

Com as variações relativas das resistências sendo:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{6Kl}{Eb h^2} F \quad (25)$$

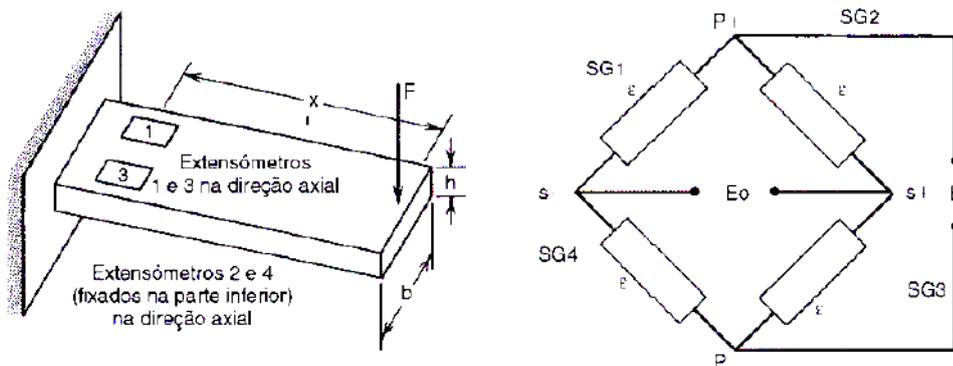
Onde a tensão de saída e a força são dadas como:

$$\frac{E_O}{E_{Fonte}} = \frac{6Kl}{Ebh^2} F \therefore F = \frac{Ebh^2 E_O}{6Kl E_{Fonte}} \quad (26)$$

A sensibilidade de uma célula de carga com lâmina engastada composta por ponte completa é dada por:

$$S = \frac{E_O}{F} = \frac{6Kl}{Ebh^2 E_{Fonte}} \quad (27)$$

Figura 2-15 Viga engastada com ponte completa

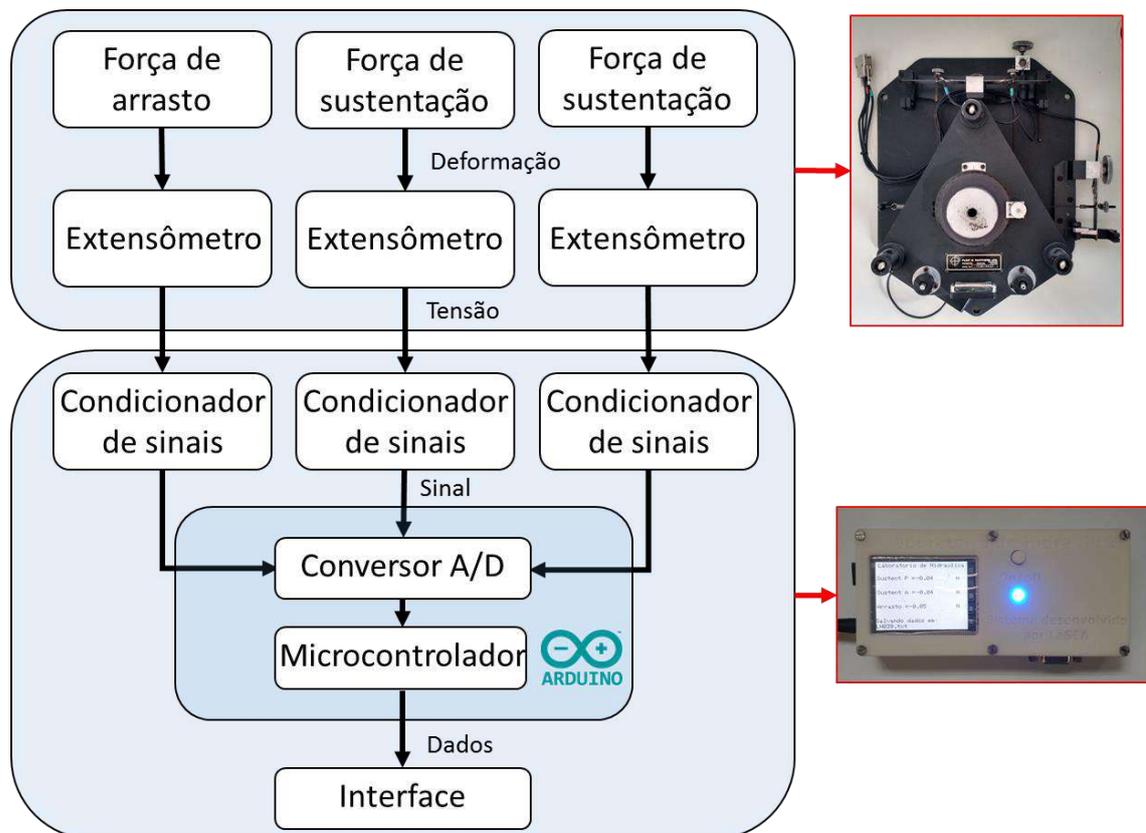


Fonte: (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2007)

Capítulo 3 – Metodologia experimental

Neste capítulo serão abordados detalhes das duas etapas que consistem no desenvolvimento da instrumentação da balança de três componentes além da montagem final e da calibração do sistema. Na figura 3-1 é mostrado um diagrama de blocos referente ao projeto. A primeira etapa consiste na instrumentação da balança aerodinâmica através da implementação da extensometria em substituição ao antigo sistema de medição das forças de arrasto e sustentação. A segunda etapa consiste na criação de um sistema de condicionamento e aquisição de dados através de placas condicionadoras de sinal e de uma plataforma desenvolvida utilizando *arduino Mega 2560* e programação em código livre permitindo armazenar os dados do ensaio em um cartão de memória.

Figura 3-1 Diagrama de blocos do projeto



Fonte: Elaborada pelo autor

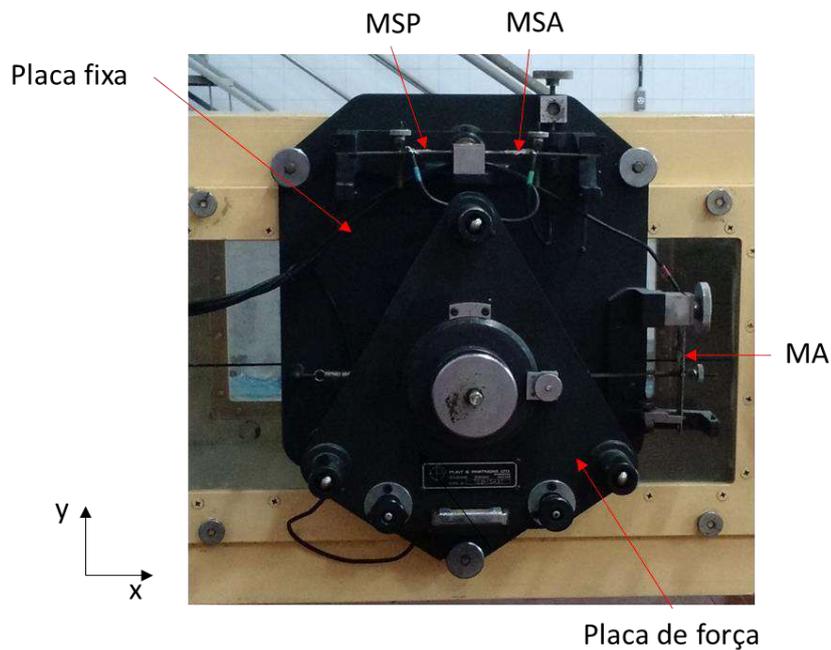
3.1. Instrumentação da balança de três componentes

A balança de três componentes da empresa inglesa *Plint & Partnes*, é uma balança aerodinâmica externa, ou seja, é fixada a parede lateral da seção de testes do túnel de vento, e é apropriada para fazer medidas das forças de arrasto, sustentação e do momento de arfagem de corpos bidimensionais, como perfis de referência por exemplo: modelos cilíndricos, placas e aerofólios, com largura pouco menor que a da seção de teste (CAVALIERI; SILVA; SILVA, 2015).

A balança é constituída por uma placa de força e uma placa base ou fixa, onde a placa base é fixada a lateral da seção de testes do túnel de vento e a placa de força é móvel, porém, o acoplamento entre as placas só permite 3 graus de liberdade (translação em x e y e rotação no plano xy). As molas são então engastadas em uma extremidade na placa de base e ao centro são conectadas as fitas responsáveis pela transmissão das forças. Estas fitas são conectadas à placa de força de modo que qualquer força atuante sobre o eixo conectado é transmitida para a placa de força pelo acoplamento rígido (eixo do modelo e placa de força) e para as molas através das fitas.

Para medição das forças o eixo modelo deve ser engastado na placa de força através de um mecanismo de travamento próprio. O peso do modelo e da placa de força aplicam uma pré tensão sobre as molas de sustentação anterior (MSA) e posterior (MSP) enquanto que a mola de arrasto (MA) permanece em repouso. Quando iniciado o escoamento o arrasto aumenta iniciando uma tensão na mola de arrasto e a sustentação aumenta ou diminui dependendo do modelo utilizado e de seu ângulo de ataque. Quando a sustentação do modelo aumenta, a tensão sobre a mola é reduzida e a soma da redução dará o valor da força de sustentação instantânea do modelo; já na mola de arrasto esta força é medida diretamente já que só existe tensão sobre a mola se houver arrasto.

Figura 3-2 Balança aerodinâmica de 3 componentes



Fonte: Elaborada pelo autor

Na versão original da balança as deflexões provocadas pelas forças sobre as molas eram medidas através de instrumentos analógicos como relógios comparadores e micrômetros, provocando os inconvenientes discutidos anteriormente.

Para o retrofiting deste método de medição, utilizou-se um novo sistema de medição destas deflexões baseado em extensometria em ponte completa, ou seja 4 extensômetros ativos, localizados em um ponto próximo ao ponto de engaste das vigas, já que é a região que sofre maior deformação mecânica (ver figura 3-3 para MSA e MSP e figura 3-4 para a MA), assim totalizando 3 pontes completas e 12 extensômetros.

Figura 3-3 Pontes completas sobre as molas de sustentação anterior e posterior



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3-4 Ponte completa sobre a mola de arrasto



Fonte: Elaborado pelo autor

A utilização de ponte de wheatstone completa aumenta a sensibilidade dos elementos sensores e promove a compensação de temperatura evitando que variações de temperatura ambiente alterem as medidas. A medida que as forças de

sustentação e arrasto sobre o corpo deflexionam as molas metálicas provocam, também, quedas de tensão proporcionais a estas deflexões nas pontes completas (devido a variação das resistências ocasionadas pela deformação dos extensômetros). Uma placa condicionadora de sinal alimenta as pontes e captura esses sinais fazendo um condicionamento e amplificação dos mesmos.

Os extensômetros de resistência elétrica utilizados são da empresa *Excel Sensores Ind. Com. Exp.* modelo unidirecional simples de formas tradicionais PA-06-250BA-120LEN. São extensômetros com base de polyimida com filme metálico de constantan, auto compensação de temperatura para aço, com 120Ω , encapsulados com fios de cobre, com uma grelha de 6,35mmx3,18mm e com dimensões totais de 9,47mmx3,18mm. Possuem um fator *gauge* de 2,02.

O processo de colagem dos extensômetros foi feito com o adesivo KBR-610 da empresa *Excel sensores*, que é recomendado para a utilização em transdutores. Após esse processo foram soldados fios de cobre aos seus terminais, em seguida as pontes foram revestidas com uma fita adesiva transparente com a finalidade de proteger e aumentar a resistência dos fios soldados.

3.2. Sistema de condicionamento e aquisição de dados

A segunda etapa do projeto consiste na elaboração de um circuito que condicione os sinais provenientes das pontes de wheatstone, filtrando os ruídos e amplificando as variações das tensões das pontes e na criação de um sistema de aquisição de dados em tempo real, que mostre os dados em um display LCD e os armazene em um dispositivo de armazenamento de dados do tipo microSD.

3.2.1. Condicionamento do sinal

Para o condicionamento e amplificação dos sinais foram utilizados 3 módulos conversores A/D de precisão (um para cara ponte), modelo HX711 de resolução de 24 bits, específicos para sensores de peso, figura 3-5, os quais são fabricados pela empresa *Sparkfun*. Esses módulos conversores tem a função de alimentar os circuitos das pontes de wheatstone, capturar as tensões de saída das pontes, condicionar os sinais, eliminando os ruídos e amplificando o sinal e por fim converter os valores analógicos em valores digitais para que esses valores possam ser processados pelo microcontrolador. Esses módulos possuem dois canais de entrada diferencial, onde o canal A pode ser programado para ganhos de 128 e 64, que garantem uma entrada diferencial de tensão de ± 20 mV ou ± 40 mV respectivamente quando a placa for alimentada com 5 V, o canal B possui um ganho fixo de 32 com entrada diferencial de ± 80 mV.

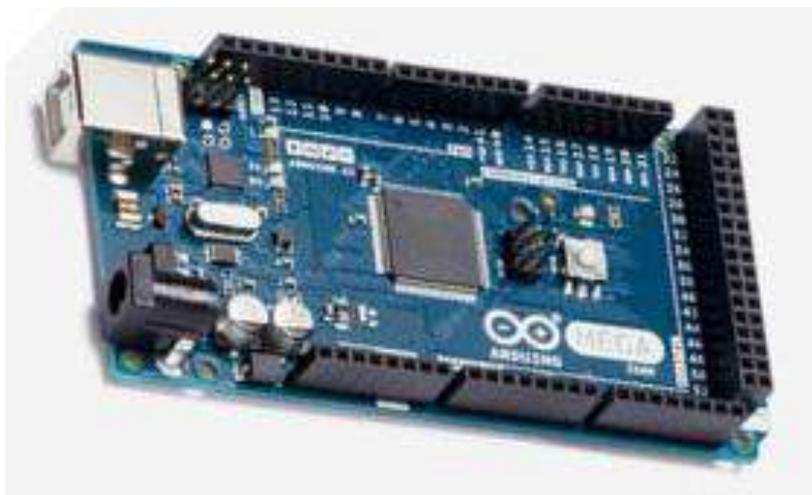
Outras características importantes desses módulos são: possuir um oscilador no próprio módulo, não precisar de programação para os registradores internos pois todos os controles são feitos por pinos, possibilidade de escolha da taxa de dados de saída e saída serial.

Figura 3-5 Módulo conversor A/D HX711



Fonte: ("hx711", 2017)

Figura 3-7 Placa de desenvolvimento *Arduino Mega 2560*



Fonte: (“Arduino Mega 2560”, 2017)

Tabela 3-1 Principais características *Arduino Mega 2560*

Arduino Mega 2560

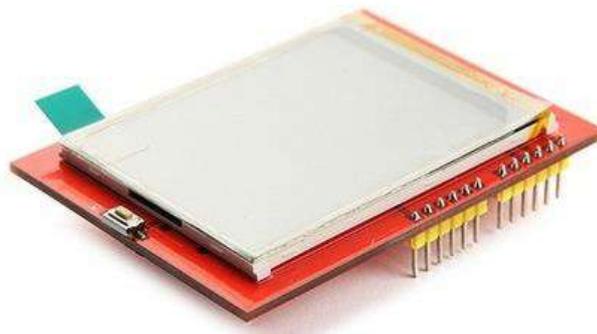
Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada	7-12 V
Limite de tensão de entrada	6-20 V
Portas digitais (I/O)	54(15 possuem saída PWM)
Portas analógica (I/O)	16
Corrente DC por porta (I/O)	20 mA
Corrente DC para porta de 3,3 V (I/O)	50 mA
Memória flash	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade de Clock	16 MHz
Comprimento	101,52 mm
Largura	53,3 mm
Peso	37 g

Fonte: Adaptado de (“Arduino Mega 2560”, 2017)

Para gravação e visualização dos dados foi usado um modulo display 2,4” TFT LCD touch screen da empresa *Adafruit* que possui um slot para cartão microSD,

figura 3-8. Os formatos de cartão microSD aceitos são FAT16 e FAT32 e as principais características do módulo podem ser vistas na tabela 3-2.

Figura 3-8 Display 2,4" TFT LCD touch screen



Fonte: ("Display 2,4" TFT LCD touch screen", 2017)

Tabela 3-2 Especificações técnicas display LCD

Especificações técnicas:	
Dimensão tela	2,4 polegadas
	Slot para cartão microSD
Cor LCD	65K
Controlador	ILI9325
Resolução	240x320
Touchscreen	4 fios resistivos touchscreen
Interface	8 bits para dados, mais 4 linhas de controle
Tensão de operação:	3,3-5 V
Dimensões	71x52x7 mm

Fonte: Adaptado de ("Display 2,4" TFT LCD touch screen", 2017)

A etapa de programação e gravação do microcontrolador foi realizada no software de código livre *Arduino 1.6.11*, onde o código completo pode ser visualizado no anexo I, ao final do trabalho. O funcionamento do código ocorre do seguinte modo:

1. O programa iniciará as suas variáveis e carregará a tara da balança, ou seja, toda a massa no sistema será considerada como tara e o sistema irar ser considerado sem massa.

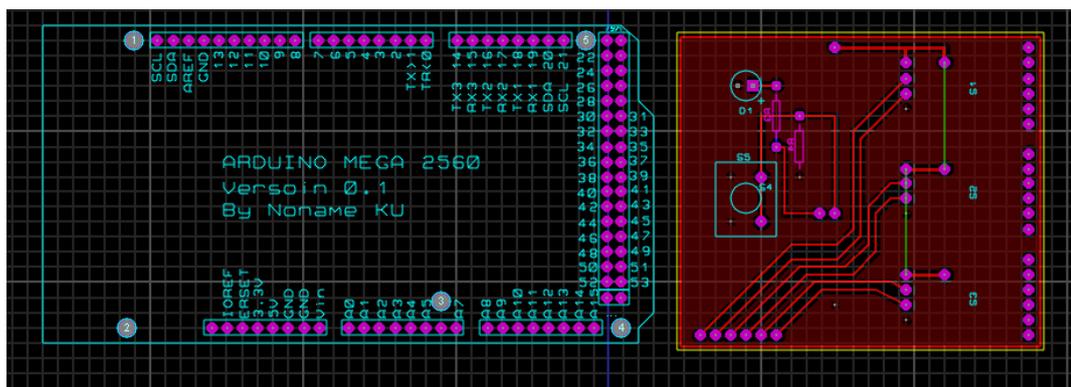
2. Ocorrerá uma verificação da presença do cartão microSD, caso o mesmo não esteja presente, irá aparecer um alerta na tela do dispositivo informando a sua ausência, contudo o programa continuará em funcionamento, caso haja a presença do cartão o programa funcionará sem apresentar nenhuma mensagem.
3. Para o armazenamento dos dados com o programa em funcionamento é necessário que se pressione um botão físico no dispositivo, e então o programa identificará a ação, acenderá uma luz de identificação e começará o processo de armazenamento. Para que o programa pare de armazenar os dados é necessário que se pressione novamente o botão, apagando a luz e encerrando o processo de armazenamento.

No anexo II é disponibilizado um manual de uso do dispositivo de aquisição de dados, contendo todas as instruções de manuseio, características e afins.

3.3. Montagem do sistema

Para montagem do dispositivo de aquisição de dados, foi preciso a confecção de uma placa de circuito impresso que comportasse todo o circuito de condicionamento de sinal, botão para iniciar a aquisição dos dados, conector da balança e o acoplasse ao circuito do Arduino, assim podendo se fazer uma conexão eficiente e prática com a placa de desenvolvimento e com as pontes de wheatstone completas. O layout da placa foi desenvolvido no software *Proteus v.8.0*, e pode ser visto nas figuras 3-9, um modelo 3D é visto na figura 3-10.

Figura 3-9 Layout da placa de circuito impresso



Fonte: Elaborado pelo autor

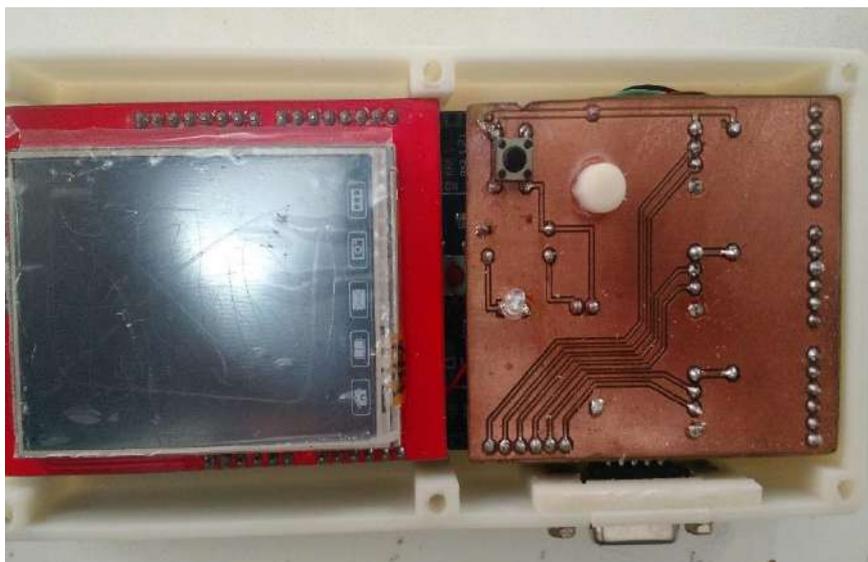
Figura 3-10 Modelo 3D da placa de circuito impresso



Fonte: Elaborado pelo autor

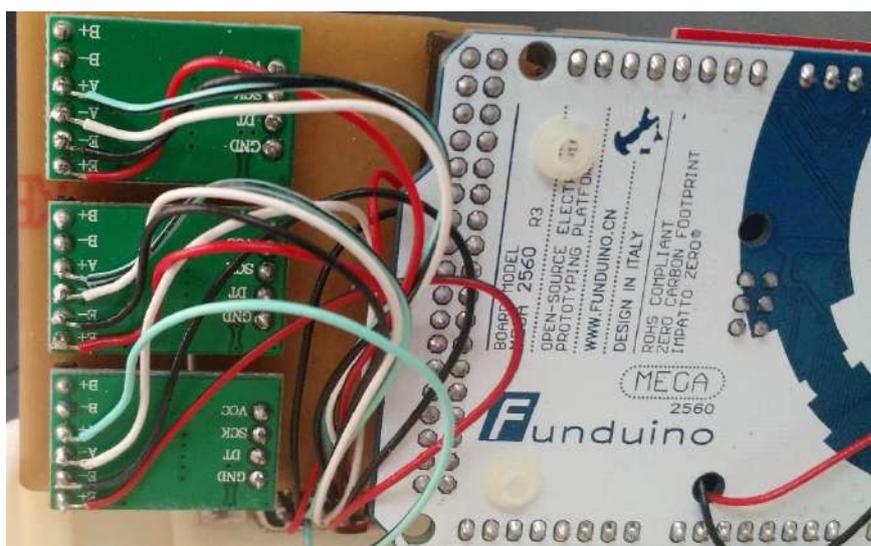
Para o circuito foi construído um pequeno gabinete, para que o dispositivo seja facilmente transportado e utilizado sem a possibilidade de ocorrer acidentes que possam vir a danificar os circuitos. As figuras 3-11 e 3-12 mostram a placa de circuito impresso finalizada e montada enquanto a figura 3-13 mostra o dispositivo pronto para uso.

Figura 3-11 Frente do dispositivo de aquisição de dados montado



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3-12 Parte de trás do dispositivo de aquisição de dados montado



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3-13 Dispositivo de aquisição de dados finalizado e em funcionamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Onde:

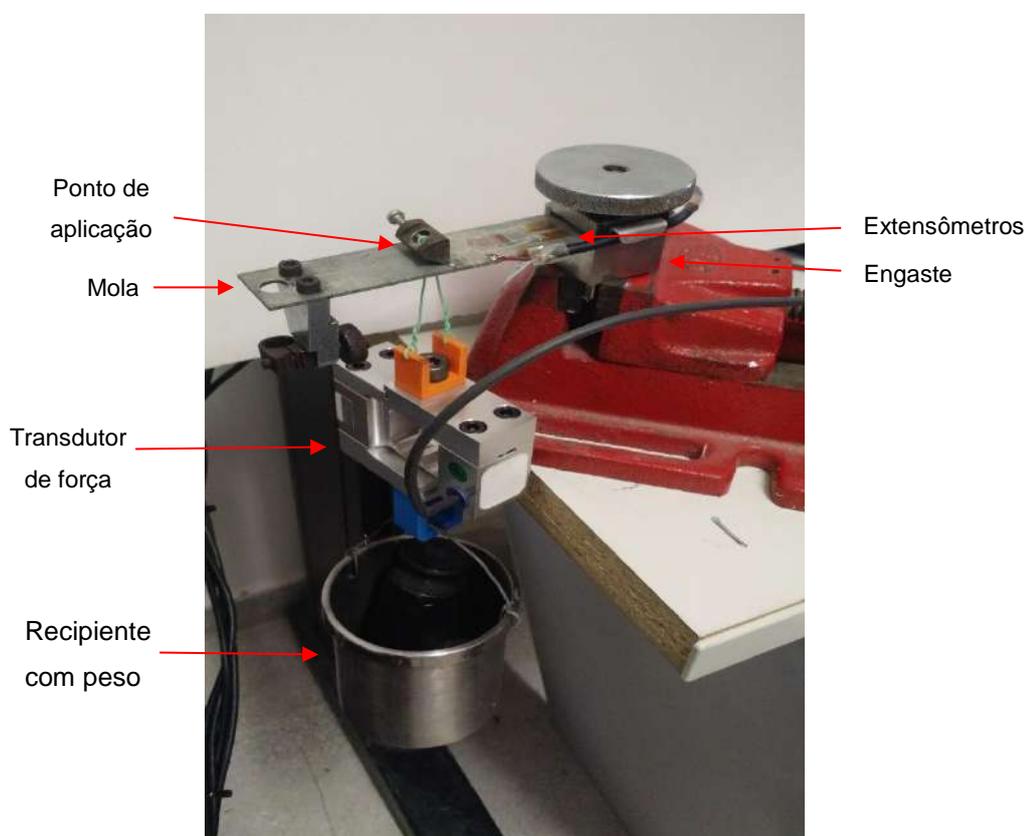
1. Conexão DB15 HD D-Sub com a balança de 3 componentes da Plint & Partness;
2. Entrada para o cartão de memória micro SD;
3. Entrada do cabo de alimentação, com plug P4;
4. Entrada do cabo serial;
5. Display LCD para visualização rápida dos resultados;
6. Botão "On/off" para iniciar o armazenamento dos dados;
7. Luz de indicação: Luz acesa indica armazenagem de dados.

3.4. Calibração estática do sistema

Para calibração do sistema foi necessário efetuar o levantamento das curvas de calibração das 3 células de carga, curvas essas que relacionam as tensões nas saídas dos condicionadores de sinal com as cargas aplicadas as células de carga. Foi utilizado uma estrutura com uma célula de carga de 10 N calibrada, acoplada a um sistema de aquisição de dados robusto para aferição dos valores de carga indicados na balança. Esta montagem pode ser observada na figura 3-14. As calibrações das molas foram feitas individualmente aplicando variações de carga de 10g a 889,5g utilizando o mesmo acoplamento da balança para reproduzir a mesma condição de engaste e sobre a mesma linha de ação das forças.

O procedimento para obtenção dos dados da balança foi utilizar o próprio dispositivo de aquisição com uma comunicação via serial com um notebook. As leituras foram feitas aplicando as cargas e aquisitando o sinal por um tempo de 1min para eliminar efeitos transitórios devido a vibração ou outros que possam ocorrer ao adicionar a carga. Com os dados obtidos neste período foram eliminadas as faixas transitórias e aplicado uma média no sinal estável. As forças aplicadas eram então consideradas como sendo a soma das massas padrão e aferidas com o sistema de aquisição auxiliar com a célula de carga calibrada. O sinal de tensão correspondente a cada força foi obtido em um programa no software *Arduino 1.6.11* na saída de tensão do condicionador de sinais, via comunicação serial com o software.

Figura 3-14 Estrutura de calibração



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5. Validação do sistema

Para validação do sistema foram feitos testes com um corpo de estudo no formato cilíndrico e um aerofólio modelo NACA 0012, com comprimento de referência menor que 1/3 da seção de teste. Os resultados experimentais foram comparados a resultados teóricos para validar a instrumentação.

Os testes foram realizados no LH/DECA/CT/UFPB com um túnel de vento do tipo sopra, figura 3-15, com as seguintes características:

- Comprimento = 4,50 m
- Largura = 2 m
- Altura = 1,8 m
- Comprimento da sessão de testes = 1150 mm
- Largura da sessão de testes = 460 mm
- Altura da sessão de testes = 460 mm
- Faixa de velocidade na sessão de testes = 10 m/s até 32 m/s
- Faixa de pressão dinâmica na sessão de testes = 8 até 57 mm de H₂O
- Nível de turbulência = 0,8%
- Potência = 22 kW

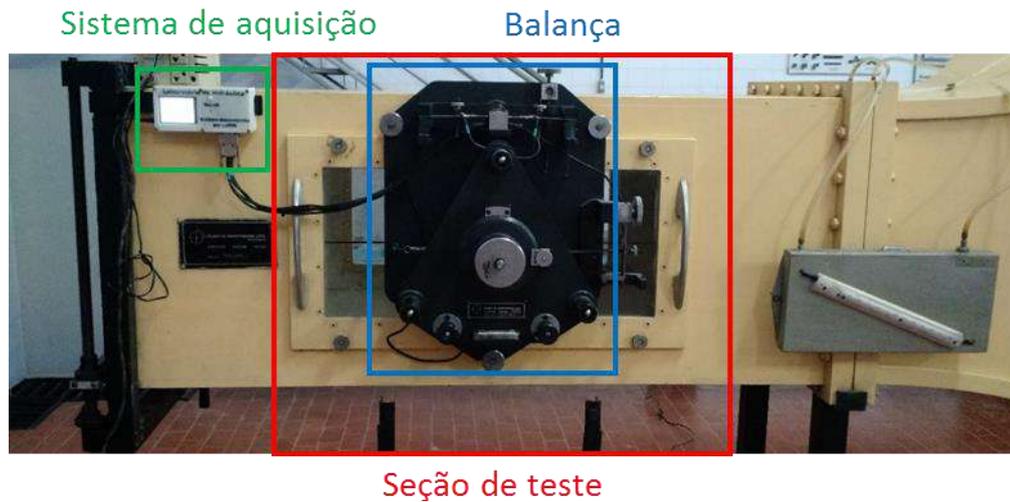
Figura 3-15 Túnel de vento do tipo sopra



Fonte: Elaborado pelo autor

Em função de restrições mecânicas no túnel de vento, atualmente sua velocidade máxima de escoamento é de 15m/s, sendo assim os testes realizados neste trabalho foram limitados a esta velocidade. Os detalhes da montagem da balança na seção de teste podem ser observados na figura 3-16.

Figura 3-16 Sistema montado no túnel de vento



Fonte: Elaborado pelo autor

Capítulo 4 – Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados das calibrações das três molas e discussões comparativas entre resultados teóricos da literatura e experimentais de modelos padrão utilizando o sistema de aquisição desenvolvido.

4.1. Calibração estática

Nas tabelas a seguir são apresentadas os dados obtidos durante a calibração das 3 células de carga, onde são apresentados os valores de saída dos condicionadores de sinal e as cargas aplicadas. As respectivas curvas de calibração são apresentadas nas figuras 4-1, figura 4-2 e figura 4-3, as quais possuem as suas respectivas linhas de tendência e as equações das retas que representam as funções de calibração. As funções de transferências utilizadas para converter o sinal de saída com conversor A/D em força são mostradas na tabela 4-4.

Para efetuar a conversão dos valores de saída do conversor A/D para tensão foi necessário a seguinte expressão:

$$Const = \frac{V_{m\acute{a}x} - V_{m\grave{i}n}}{2^n} \quad (28)$$

Onde:

Const: é a constante de conversão do valor de saída para tensão sem ganho.

$V_{m\acute{a}x}$: máxima tensão diferencial de entrada

$V_{m\grave{i}n}$: mínima tensão diferencial de entrada

n : resolução do conversor A/D

As placas condicionadoras de sinal HX 711 garantem uma tensão diferencial de entrada de ± 20 mV para um ganho de 128 com uma resolução de 24 bits; sendo assim temos:

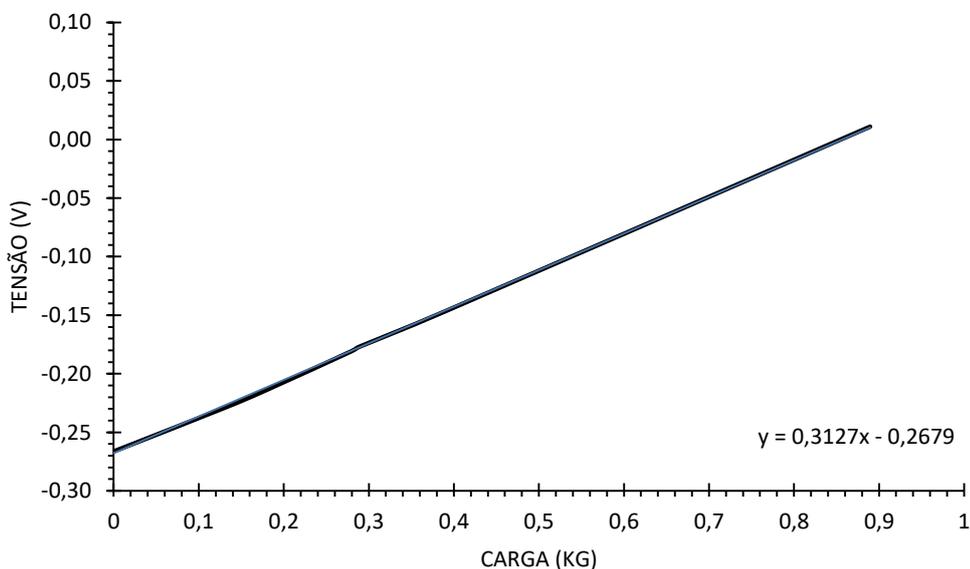
$$Const = \frac{20 \times 10^{-3} - (-20 \times 10^{-3})}{2^{24}} = 2,3841 \times 10^{-9} \quad (29)$$

Tabela 4-1 Dados da curva de calibração da célula de carga da sustentação anterior

SUSTENTAÇÃO ANTERIOR				
Massa aplicada (g)	Somatório de massas (g)	Valor de saída do condicionador	Tensão sem ganho (mV)	Tensão com ganho (V)
0	0	-872638	-2,08053112	-0,266307983
0,02	0,02	-854131	-2,036406994	-0,260660095
0,01	0,03	-844829	-2,014229298	-0,25782135
0,1	0,13	-750982	-1,790480614	-0,229181519
0,05	0,18	-700421	-1,669933796	-0,213751526
0,0995	0,2795	-592411	-1,412417889	-0,18078949
0,01	0,2895	-579174	-1,380858421	-0,176749878
0,1	0,3895	-481021	-1,146843433	-0,146795959
0,5	0,8895	35929	0,085661411	0,010964661

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4-1 Curva de calibração da célula de carga da sustentação anterior



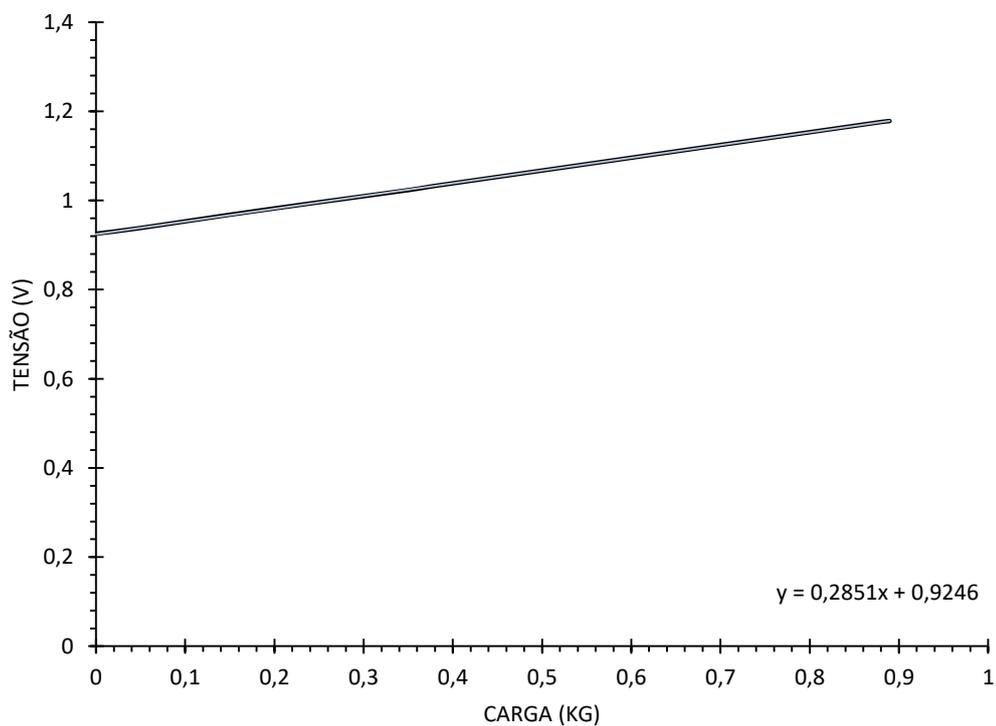
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4-2 Dados da curva de calibração da célula de carga da sustentação posterior

SUSTENTAÇÃO POSTERIOR				
Massa aplicada (g)	Somatório de massas (g)	Valor de saída do condicionador	Tensão sem ganho (mV)	Tensão com ganho (V)
0	0	3032613	7,230312824	0,925480042
0,05	0,05	3074513	7,330210209	0,938266907
0,1	0,15	3172028	7,562704086	0,968026123
0,0995	0,2495	3263142	7,77993679	0,995831909
0,1	0,3495	3352355	7,992637157	1,023057556
0,02	0,3695	3373006	8,041872978	1,029359741
0,01	0,3795	3383625	8,067190647	1,032600403
0,5	0,8795	3853354	9,187111855	1,175950317
0,01	0,8895	3860527	9,204213619	1,178139343

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4-2 Curva de calibração da célula de carga da sustentação posterior



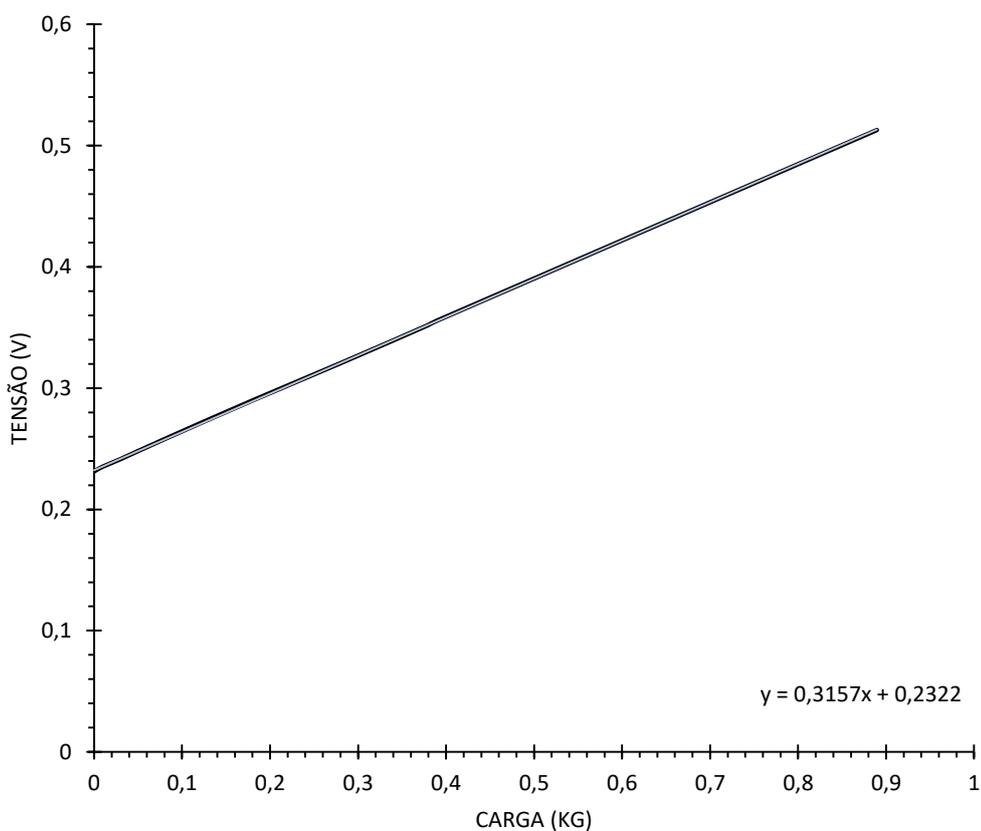
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4-3 Dados da curva de calibração da célula de carga do arrasto

Massa aplicada (g)	Somatório de massas (g)	Valor de saída do condicionador	Tensão sem ganho (mV)	Tensão com ganho (V)
0	0	757803	1,806743145	0,231263123
0,01	0,01	770938,00	1,838059425	0,235271606
0,02	0,03	791091	1,886107922	0,241421814
0,05	0,08	845144	2,014980316	0,25791748
0,0995	0,1795	949020	2,262639999	0,28961792
0,1	0,2795	1049696	2,502670288	0,320341797
0,1	0,3795	1152970	2,748894691	0,351858521
0,01	0,3895	1165074	2,777752876	0,355552368
0,5	0,8895	1680020	4,005479813	0,512701416

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4-3 Curva de calibração da célula de carga do arrasto



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4-4 Funções de transferências

Funções de transferência adquiridas	
Célula de carga	Função de transferência
Sustentação anterior	$F=3,1976x + 0,8568$
Sustentação posterior	$F=3,5073x - 3,2426$
Arrasto	$F=3,1673x - 7,354$

Fonte: Elaborado pelo autor

A sensibilidade das funções de transferências em relação a tensão pode ser vista na tabela 4-5.

Tabela 4-5 Sensibilidade da função de transferência

Sensibilidade da função de transferência em tensão	
Sustentação anterior	0,312 V/KgF
Sustentação posterior	0,285 V/KgF
Arrasto	0,315 V/KgF

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2. Testes em túnel de vento com modelos padrão

Os testes foram divididos em duas etapas, onde a primeira etapa consistiu em realizar o experimento utilizando um cilindro como corpo de estudo, figura 4-4. O cilindro utilizado é totalmente liso, com diâmetro de 76 mm, largura de 454 mm. O teste foi realizado a uma temperatura de aproximadamente 35°C sob escoamento de 15 m/s, verificado com um anemômetro de fio quente. Sendo assim o cálculo teórico da força de arrasto com as condições citadas foi realizado da seguinte maneira:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{1,145 \times 15 \times 0,076}{1,910 \times 10^{-5}} = 6,83 \times 10^4 \quad (30)$$

Onde:

Re: Número de Reynolds

ρ : Densidade do ar na condição ambiente

V: Velocidade do fluido

D: Diâmetro do cilindro

μ : viscosidade dinâmica na condição ambiente

Observando a figura 2-3, temos que o coeficiente de arrasto para um cilindro é 1, sendo a força de arrasto calculada por:

$$F_D = \frac{C_D \times A \times \rho \times V^2}{2} = \frac{1 \times 0,454 \times 0,0076 \times 1,145 \times 15^2}{2} = 4,49 \text{ N} \quad (31)$$

Onde:

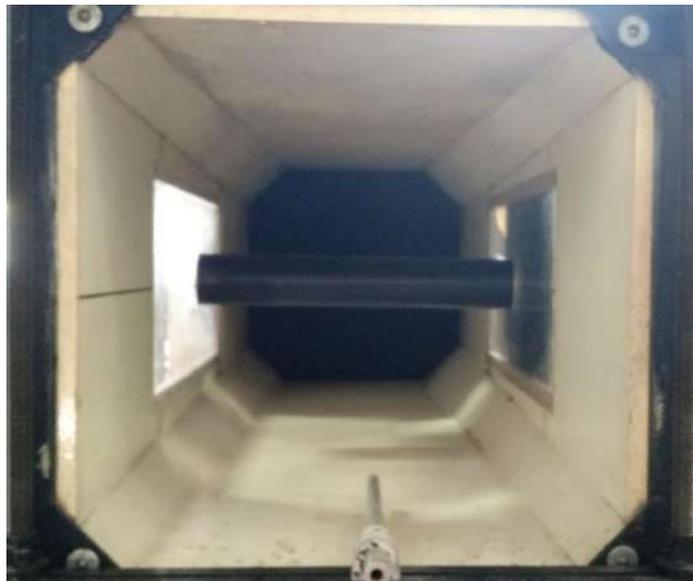
C_D : Coeficiente de arrasto

ρ : Densidade do ar na condição ambiente

V: Velocidade do fluido

A: Área frontal do cilindro

Figura 4-4 Cilindro padrão montado na seção de teste



Fonte: Elaborado pelo autor

Foi feita a média dos valores de força de arrasto aquisitados com o experimento, obtendo assim um valor de 4,519 N. De posse desta informação foi realizado um cálculo de erro relativo com o valor teórico calculado anteriormente para comprovar a veracidade dos dados onde o erro relativo é dado por:

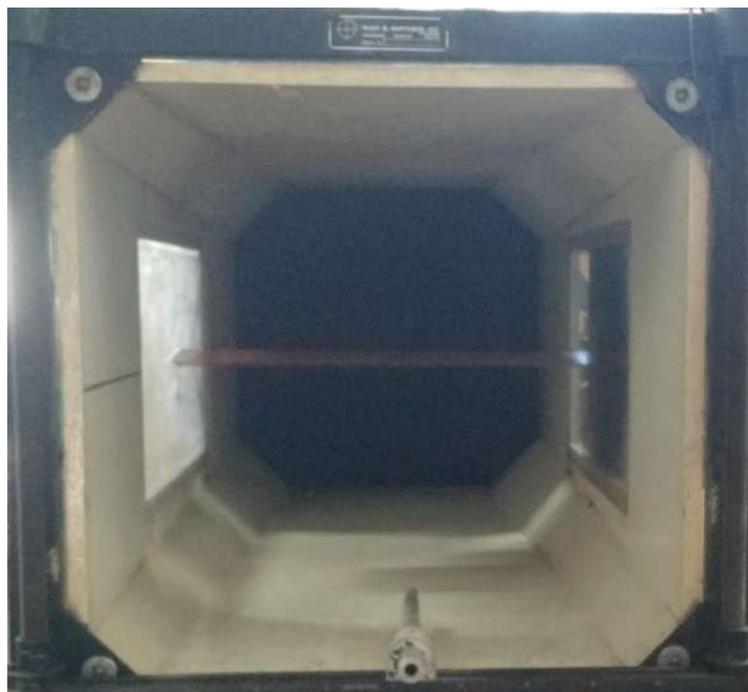
$$\varepsilon = \frac{|valor\ teórico - valor\ experimental|}{Valor\ teórico} \times 100\% \quad (32)$$

$$\varepsilon = \frac{|4,49 - 4,51|}{4,49} \times 100\% = 0,44\% \quad (33)$$

Um erro relativo de 0,44% foi de acordo com o esperado e com um bom grau de confiabilidade, validando o sistema.

Contudo foi realizado um outro teste com um aerofólio modelo NACA 0012, com 150mm de corda e 454mm de envergadura. O teste foi realizado sob as mesmas condições dos testes com o cilindro. O comprimento do modelo tem 0,150 m e foi calculado um número de Reynolds de 134800, este com o intuito de se analisar, também, a força de sustentação com força de arrasto simultaneamente, figura 4-5.

Figura 4-5 Perfil NACA 0012 montado na seção de teste



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 4-6, a qual contém a média das forças de sustentação anterior, posterior e força de arrasto para os diferentes ângulos de ataques utilizados durante o experimento com um número de Reynolds de $Re=1,34.10^5$. Os ângulos de ataque foram alterados de 3 em 3°, começando no ângulo de -30° e finalizando em +30°. Na tabela são apresentados outros valores como os coeficientes de arrasto, sustentação e força total de sustentação.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1,145 \times 15 \times 0,150}{1,910 \times 10^{-5}} = 1,34 \times 10^5 \quad (34)$$

Para se determinar os coeficientes de arrasto e sustentação foi necessário dividir as forças por uma constante determinada por:

$$\frac{\rho x V^2 x A}{2} = \frac{1,145 \times 15^2 \times 0,150 \times 0,454}{2} = 8,88806 \quad (35)$$

Tabela 4-6 Dados do experimento com o NACA 0012

ÂNGULO	SUST P (N)	SUST A (N)	ARRASTO (N)	SUST (N)	CL	CD
-30	-6,206	-2,935	2,184	-9,141	-1,028	0,243
-27	-5,481	-2,910	1,868	-8,391	-0,944	0,208
-24	-5,117	-2,715	1,574	-7,832	-0,881	0,175
-21	-4,794	-2,384	1,252	-7,178	-0,808	0,139
-18	-4,610	-2,276	1,075	-6,886	-0,775	0,119
-15	-4,390	-2,348	0,858	-6,737	-0,758	0,094
-12	-4,476	-2,903	0,629	-7,378	-0,830	0,069
-9	-3,774	-3,677	0,216	-7,451	-0,838	0,022
-6	-2,864	-2,377	0,195	-5,241	-0,590	0,020
-3	-1,830	-1,032	0,170	-2,862	-0,322	0,017
0	0,211	0,873	0,164	1,084	0,122	0,016
3	2,039	2,470	0,221	4,509	0,507	0,023
6	3,016	3,811	0,283	6,827	0,768	0,030
9	3,633	4,539	0,408	8,171	0,919	0,044
12	3,770	3,717	0,680	7,487	0,842	0,074
15	3,605	3,447	0,837	7,052	0,793	0,092
18	3,691	3,510	0,996	7,201	0,810	0,110
21	3,971	3,646	1,233	7,616	0,857	0,136
24	4,358	3,804	1,449	8,162	0,918	0,161
27	4,868	3,977	1,718	8,845	0,995	0,191
30	5,640	4,198	2,138	9,838	1,107	0,238

Fonte: Elaborado pelo autor

Na tabela 4-7 e tabela 4-8 são apresentados os valores teóricos que caracterizam o modelo NACA 0012 para números de Reynolds de $Re=1.10^5$ e

$Re=2.10^5$, que servirão de base para comparação e conseqüentemente validação da instrumentalização efetuada neste projeto.

Tabela 4-7 Valores teóricos das características do NACA 0012

Re=100000		
Ângulo	CL	CD
-11	-0,8854	0,06914
-9	-0,9309	0,03917
-6	-0,6955	0,02468
-3	-0,4311	0,01726
0	0	0,01642
3	0,431	0,01726
6	0,6954	0,02467
9	0,931	0,03917
11	0,8855	0,06922

Fonte: Adaptado de (“Dados teóricos NACA 0012”, 2017)

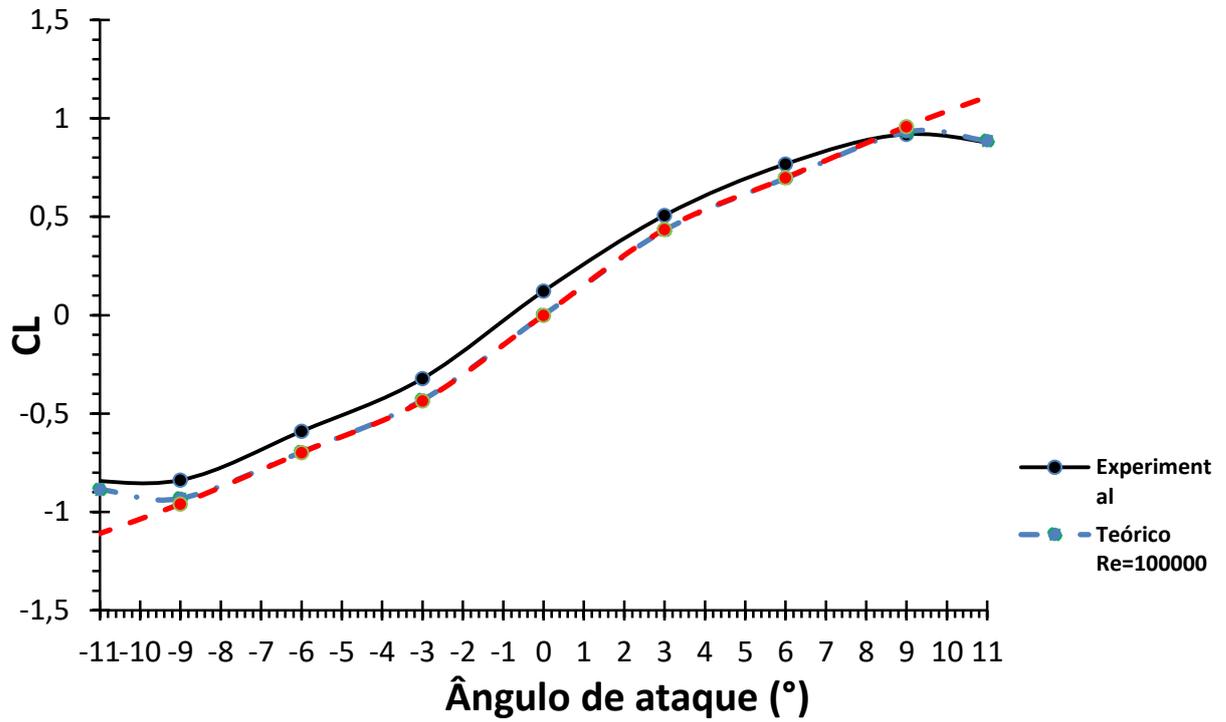
Tabela 4-8 Valores teóricos das características do NACA 0012

Re=200000		
Ângulo	CL	CD
-12	-1,1826	0,03663
-9	-0,9587	0,02399
-6	-0,6980	0,01715
-3	-0,4362	0,01378
0	0,0000	0,00961
3	0,4361	0,01378
6	0,6979	0,01715
9	0,9588	0,02399
12	1,1829	0,03664

Fonte: Adaptado de (“Dados teóricos NACA 0012”, 2017)

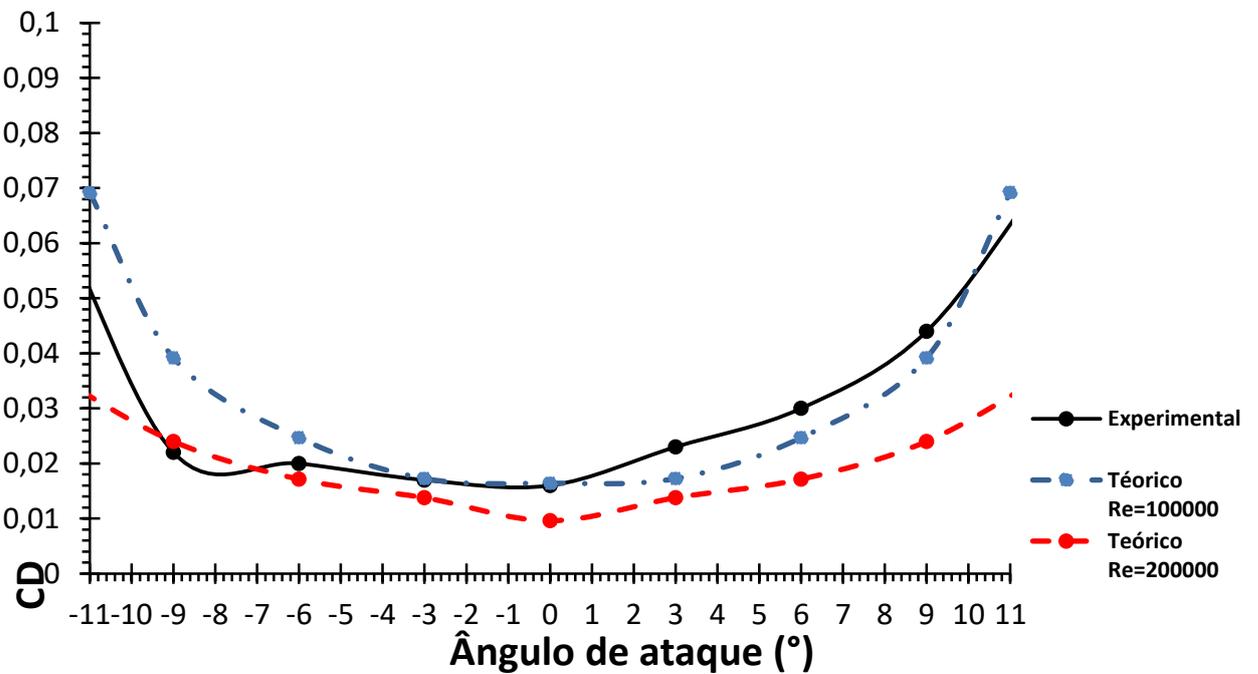
As figuras 4-6 e figura 4-7 representam as curvas experimentais e teóricas que representam as características do modelo NACA 0012 com os números de Reynolds já citados.

Figura 4-6 Curva CL X α



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4-7 Curva CD X α



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados foram considerados satisfatórios, apresentando curvas semelhantes as curvas teóricas, contudo apresentando pequenas divergências devido a rugosidade superficial que foi comprometida ao lixarmos o modelo para remoção de partículas que se encrustaram ao modelo no decorrer do tempo.

Capítulo 5 – Conclusões

Com este projeto verificou-se a importância da eletrônica e da instrumentação no dia a dia, podendo ser utilizados conceitos aprendidos na graduação como a extensometria e processamento digital de sinais para agilizar e tornar algumas atividades mais eficientes, como no caso dos laboratórios que utilizem a balança aerodinâmica que agora poderão ser realizados de maneira mais prática, onde os dados poderão ser analisados ao fim do experimento e os alunos poderão se concentrar no experimento em si, evitando assim o tempo despendido com as anotações de dados.

A calibração estática visou verificar comprovar a linearidade entre tensão e força aplicada nas células de carga que por ter sido feito com cargas abaixo de 1kg, apresentou uma curva completamente linear comprovando a lei de Hooke, inclusive coincidindo com a curva de tendência. Também foi possível converter as tensões das pontes de wheatstone em forças através das funções de transferência encontradas com os levantamentos das curvas de calibração.

O ensaio de medição da força de arrasto com o cilindro liso se mostrou bastante eficiente, pois foi calculado um erro relativo menor que 1% em comparação ao valor teórico calculado mostrando uma excelente eficiência do sistema de medição e aquisição. Contudo ao ser feito o teste com o modelo NACA 0012 as curvas que caracterizam o modelo mostraram certa divergência com as curvas presentes na literatura, porém devido ao modelo disponível no LH ser bastante antigo apresentando algumas falhas de simetria e na rugosidade superficial, essa divergência é aceitável, concluindo assim que o projeto apresentou um resultado satisfatório na sua instrumentação além da revitalização da balança e a modernização de seu sistema de medição.

Referências bibliográficas

ABNT. NBR 6123: Forças devido aos ventos. p. 66, 1988.

Arduíno Mega 2560. Disponível em:

<<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>>. Acesso em: 16 maio. 2017.

AVIA SEMICONDUCTOR. 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. **Hx711**, v. 9530, n. 592, p. 1–9, 2016.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007.

BARLOW, JEWEL B.; RAE, W. H.; POPE, A. **Low-Speed wind tunnel testing**. 3. ed. New York.

CAVALIERI, A. V. G.; SILVA, A. F. C.; SILVA, R. G. A. Apostila do laboratório de aerodinâmica. 2015.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**.

CONTESINI, L. **Túnel de vento Maranello-Italia**. Disponível em: <<https://www.flatout.com.br/como-funciona-um-tunel-de-vento/>>. Acesso em: 7 maio. 2017.

COUTINHO, F. R. **PROJETO DE UM TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO DO TIPO SOPRADOR**. Rio de Janeiro.

Dados teóricos NACA 0012. Disponível em:

<<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

Display 2,4" TFT LCD touch screen. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-70544-display-lcd-tft-2-4-touchscreen-shield-para-arduino.html>>. Acesso em: 17 maio. 2017.

ÉGEA, F. S. DE O.; COIMBRA, R. F. DE F. **Projeto de uma Balança Aerodinâmica para o Túnel de Vento Subsônico da FEAU**. 2008

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução a mecânica dos fluídos**. 8ª ed ed. LTC Editora, 2014.

GOMES, S. C. **Resistência dos materiais**.

hx711. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-36af07-modulo-conversor-hx711-para-sensor-de-peso.html>>. Acesso em: 16 maio. 2017.

LUPORINI, P. **Balança Sting**. Disponível em:

<<http://www.geocities.ws/pauloluporini/sting.html>>. Acesso em: 8 maio. 2017.

Naca 0012 characteristics. Disponível em:

<<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0012h-sa>>. Acesso em: 25 maio. 2017.

PANTEC. **Strain Gage PANTEC**. Disponível em:

<<http://www.panambra.com/produto/PROMOcaO-DE-STRAIN-GAGES-PANTEC>>. Acesso em: 12 maio. 2017.

POLITERM. **Túnel Aerodinâmico**. Disponível em:

<<http://www.politerm.com.br/Produto-BANCADAS-DIDATICAS-Tunel-Aerodinamico-de-vento-marca-EDUCARE-modelo-Tunel-Aerodinamico-de-vento-marca-POLITERM-modelo-POL-1500TV-versao-188-205.aspx>>.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da engenharia aeronáutica**. Trilha, 2013.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-Layer Theory**. 7 Ed ed.

SOETHE, V. L. et al. **PROJETO DE CONSTRUÇÃO DE UMA BALANÇA AERODINÂMICA**. Blumenau: 2011

WEBSTER, J. G.; PALLÁS-ARENY, R. **Sensors and Signal Conditioning**.

Anexos

Anexo I – Código utilizado para programar o Arduino

```
//BIBLIOTECAS INCLUSAS                                     #define MAGENTA 0xF81F

                                                            #define YELLOW  0xFFE0

#include "HX711.h"                                           #define WHITE   0xFFFF

#include <Adafruit_GFX.h>

#include <Adafruit_TFTLCD.h>                                //CRIAÇÃO DE VARIÁVEIS

#include <SPI.h>

#include <SD.h>                                             const int chipSelect = 10;

                                                            int led=42;

//DEFINIÇÕES                                               int botao=43;

                                                            int var=0;

#define LCD_CS A3                                           int var2=0;

#define LCD_CD A2                                           int estado=0;

#define LCD_WR A1                                           double imp1=0;

#define LCD_RD A0                                           double imp2=0;

#define LCD_RESET A4                                       double imp3=0;

#define BLACK  0x0000                                       char filename[16];

#define BLUE   0x001F

#define RED    0xF800                                       HX711 scale1(A11, A10);

#define GREEN  0x07E0                                       HX711 scale2(A13, A12);

#define CYAN   0x07FF                                       HX711 scale3(A15, A14);
```

```

Adafruit_TFTLCD      tft(LCD_CS,
LCD_CD,   LCD_WR,   LCD_RD,
LCD_RESET);
//Serial.println(scale2.read_average(20
));

scale2.set_scale();

File dataFile;
scale2.tare();

void setup()
// CANAL 3

{
Serial.begin(9600);
//Serial.print("Media de 20 leituras
canal 3: \t\t");

// CANAL 1
//Serial.println(scale3.read_average(20
));

//Serial.print("Media de 20 leituras
canal 1: \t\t");
scale3.set_scale();
scale3.tare();

//Serial.println(scale1.read_average(20
));
// INICIANDO TELA LCD

scale1.set_scale();

scale1.tare();
Serial.println(F("Iniciando tela lcd"));

delay(500);

// CANAL 2
tft.begin(0x9341);

tft.setRotation(3);

//Serial.print("Media de 20 leituras
canal 2: \t\t");
tft.fillScreen(BLACK);

tft.setTextSize(2);

```

```

tft.setCursor(10,5);

tft.println("Laboratorio de Hidraulica
");

tft.setTextSize(2);

tft.setCursor(5,50);

tft.println("Sustent P =");

tft.setCursor(5,100);

tft.println("Sustent A = ");

tft.setCursor(5,150);

tft.println("Arrasto = ");

tft.setTextSize(2);

tft.setCursor(280,50);

tft.println("N");

tft.setCursor(280,100);

tft.println("N");

tft.setCursor(280,150);

tft.println("N");

// INICIANDO CARTÃO SD

Serial.println("Iniciando cartao sd
\t\t");

pinMode(SS, OUTPUT);

if (!SD.begin(chipSelect)) {

tft.setTextSize(2);

tft.setTextColor(CYAN);

tft.setCursor(0,168);

tft.print("MicroSD ausente, para
salvar insira e reinicie!");

//while (1) ;

}

Serial.println("Cartao presente");

int n = 0;

sprintf(filename, sizeof(filename),
"LH%03d.txt", n);

while(SD.exists(filename)){

n++;

sprintf(filename, sizeof(filename),
"LH%03d.txt", n);

}

dataFile = SD.open(filename,
FILE_WRITE);

dataFile.println( "Sustentação P(N);
Sustentação A(N); Arrasto(N)");

dataFile.close();

pinMode(led,OUTPUT);

pinMode(botao,INPUT);}

```

```

void loop()
{
    var=digitalRead(botao); // ler o valor
    enviado pelo botão: "HIGH" ou "LOW"

    if ((var == HIGH) && (var2 == LOW)) {

        estado = 1 - estado;

        delay(20);}

    var2=var;

    if (estado == 1) {

        digitalWrite(led, HIGH);

        imp1                =
scale1.get_units(5)*0.0000104964*-1;

        imp2                =
scale2.get_units(5)*0.000009569671*-
1;

        imp3                =
scale3.get_units(5)*0.09513*-1/10000;

        String salvar="";

        salvar += String(imp1);

        salvar += ";";

        salvar += String(imp2);

        salvar += ";";

        salvar += String(imp3);

        dataFile    =    SD.open(filename,
FILE_WRITE);

        dataFile.println(salvar);

        dataFile.close();

        Serial.println("gravacao concluida");

        tft.setTextSize(2);

        tft.setTextColor(WHITE);

        tft.setCursor(140,50);

        tft.println(imp1);

        tft.setCursor(140,100);

        tft.println(imp2);

        tft.setCursor(115,150);

        tft.println(imp3);

        tft.setTextSize(2);

        tft.setCursor(0,200);

        tft.println("Salvando dados em:");

        tft.setCursor(0,220);

        tft.println(filename);

        delay(1250);

        tft.setTextColor(BLACK);

```

```

tft.setTextSize(2);
tft.setCursor(140,50);
tft.println(imp1);
tft.setCursor(140,100);
tft.println(imp2);
tft.setCursor(115,150);
tft.println(imp3);
delay(10);}

else {
    digitalWrite(led, LOW);

    imp1 = scale1.get_units(5)*0.0000104964*-1;
    imp2 = scale2.get_units(5)*0.000009569671*-1;
    imp3 = scale3.get_units(5)*0.09513*-1/10000;

    tft.setCursor(0,220);
    tft.setTextColor(BLACK);
    tft.setTextSize(2);
    tft.println(filename);
    tft.setCursor(0,200);
    tft.println("Salvando dados em:");

    tft.setTextSize(2.5);
    tft.setTextColor(WHITE);
    tft.setCursor(140,50);
    tft.println(imp1);
    tft.setCursor(140,100);
    tft.println(imp2);
    tft.setCursor(115,150);
    tft.println(imp3);

    delay(1250);

    tft.setTextColor(BLACK);
    tft.setCursor(140,50);
    tft.println(imp1);
    tft.setCursor(140,100);
    tft.println(imp2);
    tft.setCursor(115,150);
    tft.println(imp3);

    delay(10);}
}

```

Anexo II – Manual de uso do dispositivo de aquisição de dados

Manual de instruções

Dispositivo de aquisição de dados para balança aerodinâmica de três componentes



Sumário

Sobre o instrumento	69
Componentes	70
Interface	71
Funcionamento	72
Cuidados	75

Sobre o instrumento

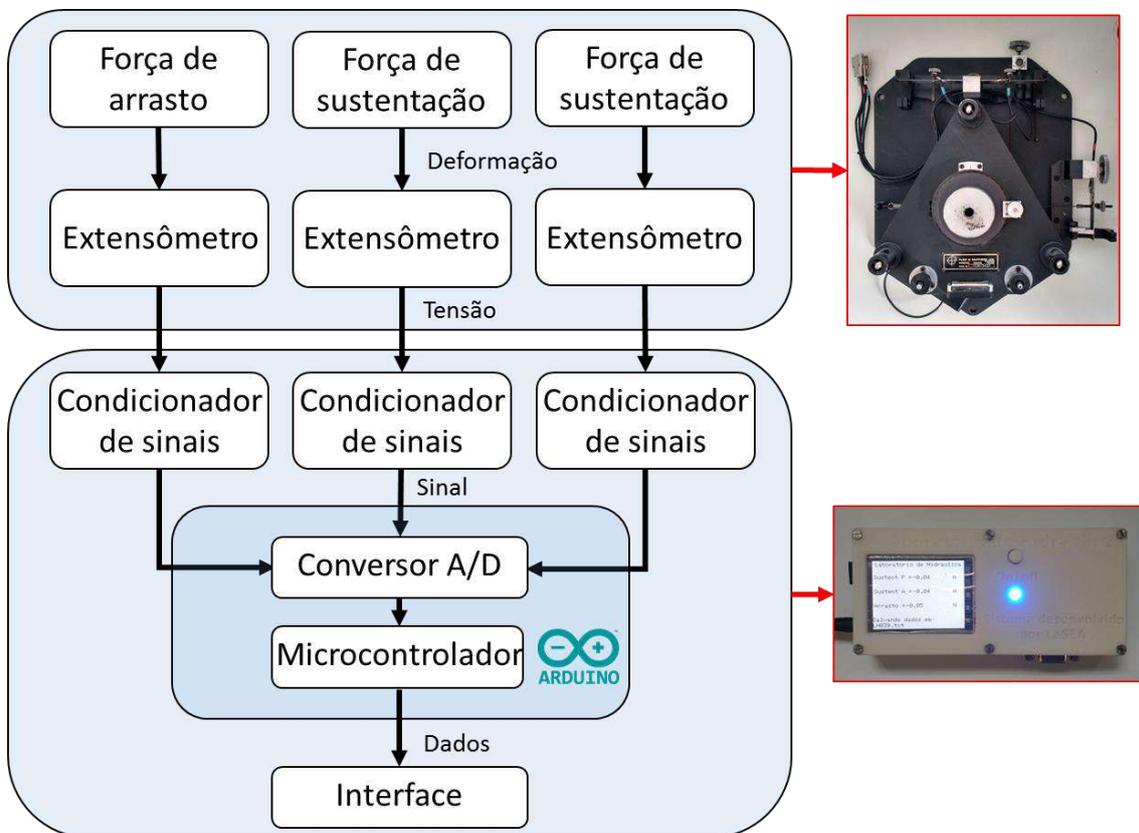
O sistema de aquisição de dados para balança de três componentes é um dispositivo de aquisição de dados desenvolvido para ler e armazenar os dados provenientes da balança de três componentes do túnel de vento Plint & Partners do Laboratório de Hidráulica (LH/DECA/CT/UFPB). Com este sistema é possível se obter uma visualização rápida e precisa dos valores de sustentação e arrasto momentâneos do perfil em análise durante os ensaios em túnel de vento. O sistema conta com uma interface simples e intuitiva cujo funcionamento está descrito neste manual.

O sistema completo conta com extensômetros instalados sobre as molas de arrasto e sustentação da balança aerodinâmica de três componentes. Estes produzem uma queda de tensão proporcional a força de arrasto e sustentação produzidas pelo protótipo em teste. Esta queda de tensão é lida, mostrada em um display LCD e armazenada em um cartão de memória micro SD para utilização dos dados pelo usuário.

Este sistema permite automatizar a leitura e possibilita aos estudantes de engenharia ter um contato com o campo experimental da instrumentação eletrônica assim como ensaios experimentais com perfis aerodinâmicos.

Componentes

- Balança de três componentes:
 - 3 Molas (sustentação anterior, sustentação posterior e arrasto);
 - 12 extensômetros excel PA-06-250BA-350LEN (4 em cada mola, formando uma ponte completa).
- Aquisitor de dados (módulo independente);
 - 01 Arduino Mega 2560;
 - 01 Placa de circuito impresso com condicionadores de sinal;
 - 03 condicionadores de sinal HX711;
 - 01 Display 2.4" TFT LCD touch screen da adafruit;
 - 01 Cartão de memória micro SD no formato FAT32(padrão);
 - 01 Fonte bivolt AC/DC de 600mA e saída de 9V com conector tipo P4;
 - 01 Case de proteção.



Interface



Figura 8. Funções do sistema de aquisição

1. Conexão DB15 HD D-Sub com a balança de 3 componentes da Plint & Partness;
2. Entrada para o cartão de memória micro SD;
3. Entrada do cabo de alimentação, com plug P4;
4. Entrada do cabo serial (uso exclusivo do LaSEA);
5. Display LCD para visualização rápida dos resultados;
6. Botão "On/off" para iniciar o armazenamento dos dados;
7. Luz de indicação: Luz acesa indica armazenagem de dados.

Funcionamento

1. Prepare o túnel de vento, posicione o objeto no eixo da balança;
2. Posicione o sistema de aquisição de dados no suporte;
3. Observe se o cartão de memória está conectado no sistema de aquisição de dados. Se não estiver, insira-o como indicado na figura 3, até ouvir um “click”.



Figura 9. Inserção do cartão de memória

Observações:

Ao iniciar o programa sem o cartão de memória, irá aparecer um alerta no display, indicando a falta do microSD, o programa irá funcionar normalmente mas não irá salvar os dados. Para salvar os dados insira o cartão e reinicie o dispositivo. (Desconectando e conectando o plug de alimentação);

O reconhecimento do cartão é feito ao iniciar do programa, após iniciar, o cartão não será reconhecido. Insira-o e reinicie o programa;

O cartão somente será reconhecido se estiver no formato FAT32 (padrão).

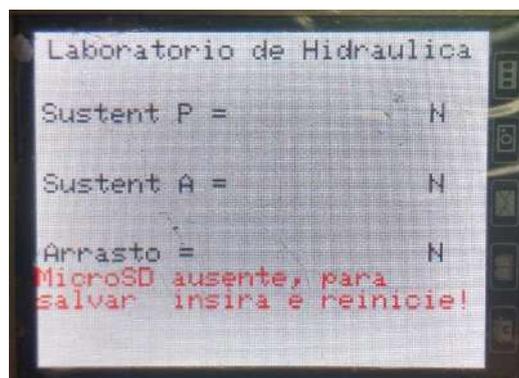


Figura 10. Erro por falta de cartão SD

4. Conectar a balança ao sistema de aquisição de dados, como indicado abaixo.

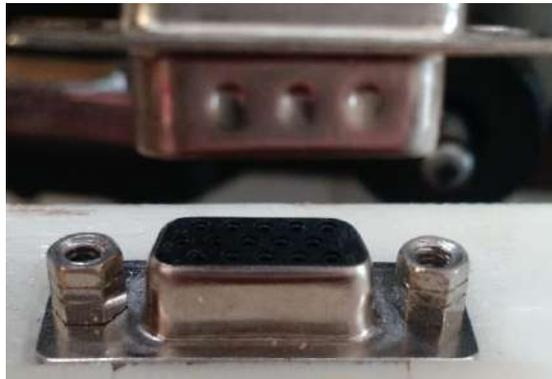


Figura 11. Conexão da balança ao sistema de aquisição de dados

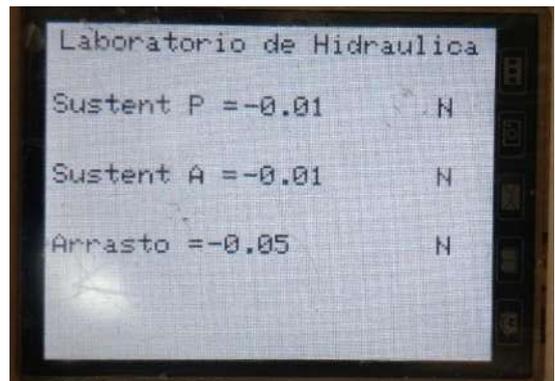
5. Conectar a fonte a uma tomada de 220V e o plug da fonte ao sistema de aquisição e esperar o início do dispositivo;



(a)



(b)



(c)

Figura 12. Iniciando o sistema.

(a) Vista lateral do sistema; (b) Plugando a alimentação; (c) Dispositivo operando.

Observações:

Sempre ao ligar o dispositivo, o programa irá reconhecer os componentes conectados e irá calcular a tara automaticamente com toda a massa instalada.

Caso haja necessidade de modificar o objeto de estudo, reiniciar o dispositivo após a troca para que a tara seja recalculada.

6. Para salvar os dados mantenha pressionado o botão on/off até o LED acender e a seguinte mensagem irá aparecer “*Salvando dados em: LHxxx.txt*”, indicando que os dados estão sendo salvos no cartão de memória e o nome do arquivo.



Figura 13. Pressionar o botão até a luz acender, para salvar os dados

7. Após o fim do experimento ou ao finalizar a faixa de dados necessária, pode-se interromper o armazenamento dos dados pressionando o botão até o LED apagar.

Observação:

Não é possível continuar salvando os dados após a interrupção, para continuar a armazenar os dados reinicie o dispositivo e um outro arquivo será criado com os novos dados.

8. Ao finalizar o experimento, desplugue a fonte do dispositivo e retire cuidadosamente o cartão de memória, pressionando o mesmo, até ouvir um “click”.

Cuidados

1. Este dispositivo eletrônico é frágil e sensível, seu manuseio exige cuidados especiais quanto a instalação adequada e armazenamento correto;
2. Nunca manuseie a balança ou o sistema de aquisição enquanto estiverem conectados;
3. Ao finalizar o experimento guarde o sistema de aquisição devidamente desconectado;
4. Mantenha o cartão micro SD sempre conectado ao sistema, só o retire para transferência de dados, após esta operação recoloque-o no local de origem;
5. Em caso de substituição da fonte por danos elétricos, deve-se substituir por uma fonte de mesmas características (600mA e 9V);
6. Não utilize o cabo serial para alimentação ou para alterar o código. O mesmo é de uso exclusivo do LaSEA;
7. Em caso de problemas não solucionados seguindo este manual, consulte o prof. Cicero da Rocha Souto (coordenador do LaSEA).