



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA

Projeto Integrador 1

Balança Aerodinâmica

Autor: Grupo 1 - Turma B
Orientador: Artur Bertoldi

Brasília, DF
2019



Grupo 1 - Turma B

Balança Aerodinâmica

Alexandre Moriya, Allecsander Silva, Erick Giffoni Felicíssimo, Fernanda Barbosa, Flávio Henrique, Gustavo Monteiro, Juliana Torri, Luzia Maria, Marcos Xavier, Matheus Henrique, Moacir Mascarenha, Pedro Falcomer, Rana Taborda e Roberto Diniz.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Artur Bertoldi

Coorientador: Carla Tatiana, Paula Meyer, Diogo Caetano e Ricardo Ajax

Brasília, DF

2019

Resumo

Este relatório é referente ao que foi desenvolvido no projeto da Balança Aerodinâmica, bem como a descrição mais detalhada da solução utilizada. Apresenta o problema encontrado, ou seja, o fato de que na UnB - Campus Gama não possui muitos equipamentos de medição para realização de experimentos no túnel de vento do Laboratório Termofluidos. A falta de equipamentos impede que alunos tenham contato com atividades práticas compatíveis com o que é aprendido nas aulas teóricas. Este projeto visa ser complementar ao que é estudado nas disciplinas relacionadas a fluidos. A balança aerodinâmica é um dispositivo capaz de medir o comportamento de um corpo quando sujeito a ações de fluidos, tendo como princípio de funcionamento medições em células de cargas. Assim, de forma mais simplificada e didática o projeto parte da concepção até a construção do protótipo, integrando conhecimento das 5 engenharias do Campus Gama para medir grandezas como as forças de arrasto e de sustentação de um corpo de prova.

Palavras-chaves: Balança Aerodinâmica. Fluidos. Túnel de vento. Corpo de prova. Sustentação. Arrasto.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Forças Aerodinâmicas Resultantes e suas Respectivas Direções	9
Figura 2 – Momento Aerodinâmico Resultante	10
Figura 3 – Asa finita	11
Figura 4 – Análise Swot	18
Figura 5 – EAP - Estrutura Analítica do Projeto	21
Figura 6 – Túnel de vento antes	26
Figura 7 – Túnel de vento depois	27
Figura 8 – Protótipo da balança construída	29
Figura 9 – Posição corrigida da haste	30
Figura 10 – Pesos atuando na balança	30
Figura 11 – Estrutura + componentes eletrônicos	31
Figura 12 – Asa para teste	31
Figura 13 – Asa nervurada	32
Figura 14 – Gabaritos NACA0012	33
Figura 15 – Volume de controle e malha - perfil NACA0012	34
Figura 16 – Zoom da malha - perfil NACA0012	34
Figura 17 – Escoamento da velocidade em torno do aerofólio	35
Figura 18 – Gráfico comparativo do ângulo de ataque e o coeficiente de sustentação	36
Figura 19 – Célula de carga de 1kg	39
Figura 20 – Célula de carga de 5kg	39
Figura 21 – Circuito montado na protoboard	40
Figura 22 – Microcontrolador Arduino UNO utilizado	40
Figura 23 – Módulo amplificador de sinal HX711	41
Figura 24 – Esquemático do circuito	42
Figura 25 – Circuito montado na estrutura da balança	43
Figura 26 – Calibrando as células de carga	44
Figura 27 – Apresentação dos dados calculados	46

Lista de tabelas

Tabela 1 – Equipe do Projeto	13
Tabela 2 – Riscos Técnicos	20
Tabela 3 – Riscos Organizacionais	20
Tabela 4 – Riscos Externos	20
Tabela 5 – Riscos Gerenciamento do Projeto	20
Tabela 6 – Custos de Estruturas	24
Tabela 7 – Custos de Eletrônica	25
Tabela 8 – Custos de Aerodinâmica	25
Tabela 9 – Coeficientes e ângulos de ataque experimentais	35
Tabela 10 – Coeficientes e ângulos de ataque simulados	36
Tabela 11 – Forças e ângulos de ataque simulados para condições do túnel	37
Tabela 12 – Forças e ângulos de ataque medidos na balança desenvolvida no projeto	38
Tabela 13 – Gasto Energético	48

Lista de abreviaturas e siglas

PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge</i> , conjunto de práticas na gestão de projetos organizado pelo instituto PMI bastante difundido, é considerado por muitos como principal guia na gerência de projetos.
EAP	Também conhecida como WBS - <i>Work breakdown structure</i> , constitui na representação visual do processo de subdivisão das entregas e do trabalho do projeto em pacotes os componentes menores, para facilitar a visualização das entregas do projeto. É estruturado observando o ciclo de vida do projeto, decomposto hierarquicamente.
UnB	Universidade de Brasília.
UED	Unidade de Ensino e Docência, prédio da UnB.
FGA	Faculdade do Gama.
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso.
EAR	Estrutura Analítica de Riscos.
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> , comumente descrito como “túnel de vento virtual”. Serve para realizar simulações aerodinâmicas de modelos virtuais 3D ou 2D.
PI1	Projeto Integrador 1 , nome da disciplina
cl	<i>Lift Coefficient</i> , o coeficiente de sustentação para 2D.
cd	<i>Drag Coefficient</i> , o coeficiente de arrasto para 2D.
CC	Células de Carga , equipamento eletrônico para aferir medidas.

Sumário

1	APRESENTAÇÃO	8
1.1	Contextualização	8
1.2	Justificativa	8
1.3	Base Teórica	8
2	ESCOPO	12
2.1	Descrição do Produto	12
2.2	Premissas e Restrições	12
2.3	Projeto	12
2.3.1	Stakeholders	12
2.3.1.1	Equipe do Projeto	12
2.3.1.2	Professores	13
2.4	Requisitos Funcionais	13
2.5	Requisitos Não Funcionais	14
2.5.1	Funcionalidade	14
2.5.2	Confiabilidade	14
2.5.3	Usabilidade	15
2.5.4	Manutenibilidade	15
2.5.5	Eficiência	15
2.5.6	Portabilidade	15
2.6	Controle e Monitoramento	15
3	GERENCIAMENTO DO PROJETO	16
3.1	Metodologia	16
3.2	Organização da Equipe	16
3.3	Subgrupos do Projeto	16
3.4	Gerenciamento de Comunicação	16
4	RISCOS	18
4.1	Riscos	18
4.2	Identificação dos Riscos	18
4.2.1	Análise SWOT	18
4.3	Análise Qualitativa	19
4.3.1	Estrutura Analítica dos Riscos - EAR	19
5	PLANO DE GERENCIAMENTO DE TEMPO	21

5.1	Cronograma	21
6	CUSTOS	24
6.1	Custo de Estruturas	24
6.2	Custo de Eletrônica	25
6.3	Custo de Aerodinâmica	25
7	SOLUÇÃO	26
7.1	Solução Estrutural	26
7.2	Solução do Perfil Aerodinâmico	31
7.3	Solução Eletrônica	38
7.4	Solução Software	43
7.4.1	O processo	43
7.4.2	Como utilizar a solução de software	46
7.5	Solução Energia	47
	REFERÊNCIAS	49
8	ANEXOS	50

1 Apresentação

1.1 Contextualização

A balança aerodinâmica é um dispositivo acoplado ao túnel de vento, com monitoramento e medição das variáveis do sistema, sendo elas: força de sustentação e força de arrasto, comportamento físico das partes da estrutura física e interpretação dos dados obtidos através de equipamentos eletrônicos.

Balanças aerodinâmicas geralmente são confeccionadas por componentes microeletrônicos ou células de carga que permitem, por meio de uma interface computacional, adquirir informações sobre os efeitos do fluxo de ar sobre o corpo de prova no momento do teste. (SMITH, 2007)

Na UnB Campus Gama, não existe equipamento de medição semelhante à balança aerodinâmica e por isso a proposta de desenvolvimento de um equipamento, mesmo que rudimentar, possibilitaria a utilização do mesmo no ambiente acadêmico ao qual a FGA está inserida. Além disso, a operação da balança é mais simples, pois não possui partes complexas e a captação dos dados é então simplificada.

1.2 Justificativa

O principal objetivo do projeto é fornecer ao Campus Gama da Universidade de Brasília um equipamento de medida e estudo para coleta e análise de dados de um corpo de prova sujeito à ação de um escoamento a baixa velocidade no túnel de vento. Dessa forma, é aberta a possibilidade de pesquisa e monitoramento aos alunos que se interessam pelo tema.

Em geral, nas disciplinas do tronco relacionadas a fluidos esse tipo de experimento não é feito, sendo portanto os alunos sujeitos a busca de dados experimentais disponíveis na literatura. Isso faz com que o aluno muitas vezes não conheça as formas que esses dados tabelados e já registrados sejam conhecidas. A criação da balança aerodinâmica é uma alternativa mais barata e acessível de proporcionar esse tipo de contato e aprendizado.

1.3 Base Teórica

Aerodinâmica é uma ciência aplicada com muitas aplicações práticas na engenharia. Não importa o quão elegante uma teoria aerodinâmica seja, ou como a solução seja

matematicamente complexa, ou o quão sofisticado seja o experimento, todos os esforços geralmente se concentram nos seguintes objetivos práticos: (ANDERSON, 2010)

- Predição das forças e momentos e transferência de calor em corpos que se movem em um fluido (geralmente o ar). Essas forças envolvem sustentação, arrasto, e momentos em estruturas aerodinâmicas.
- Determinação do comportamento do escoamento interno em dutos.

Na maioria dos casos, as forças e momentos aerodinâmicos em um corpo são provenientes de duas fontes básicas:

1. Distribuição de pressão sobre a superfície do corpo.
2. Distribuição de tensão de cisalhamento sobre a superfície do corpo.

Independente do formato do corpo, as forças e momentos aerodinâmicos são gerados basicamente por essas duas fontes. Ambas pressão e tensão de cisalhamento possuem dimensão de força por área.

Nas imagens abaixo, é possível observar um esquemático de como as forças e momentos são representadas em um perfil aerodinâmico: (ANDERSON, 2010)

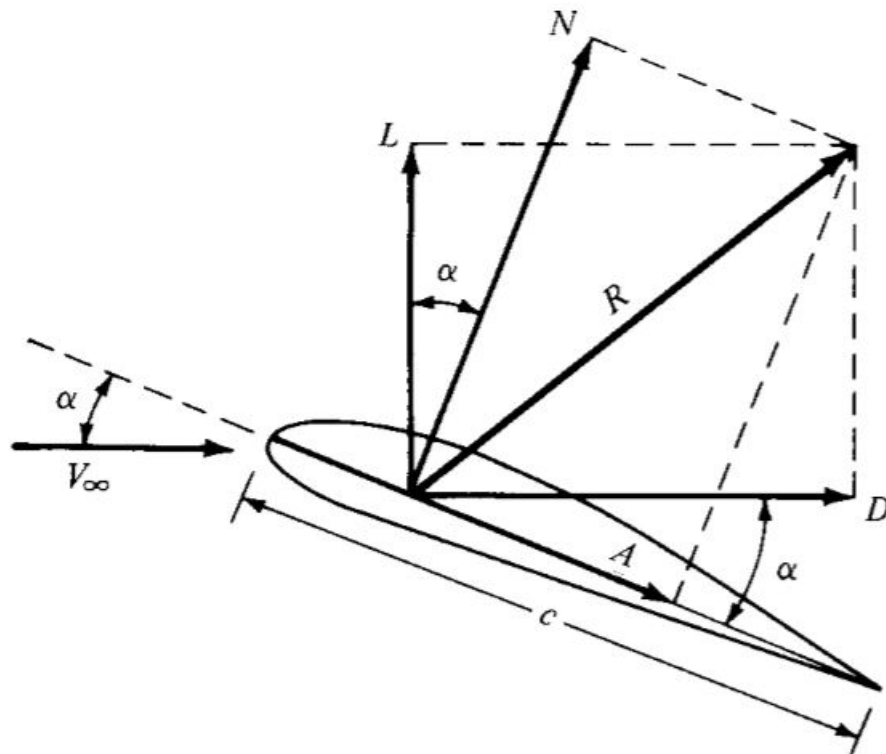


Figura 1 – Forças Aerodinâmicas Resultantes e suas Respectivas Direções

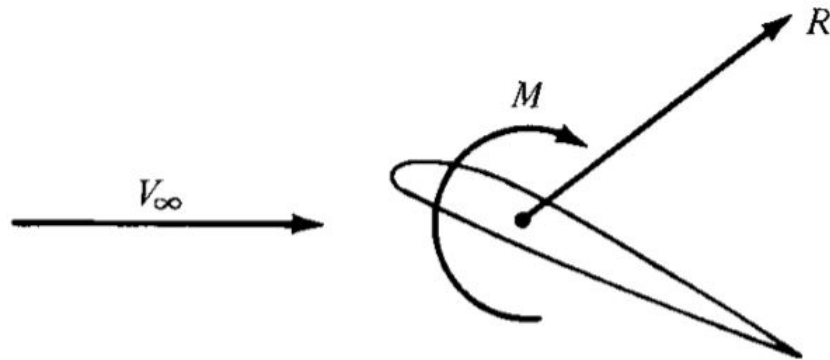


Figura 2 – Momento Aerodinâmico Resultante

Sendo o ângulo de ataque α , a sustentação L , o arrasto D , o tamanho da corda do aerofólio c , a força normal em relação à corda N , a força axial paralela à corda A , a força resultante R , o momento M e a velocidade relativa do fluido V_∞ .

A Sustentação é uma força aerodinâmica produzida pela ação do vento relativo em um aerofólio, influenciada por superfícies de controle como hipersustentadores (*flaps*), *aileron*s e profundos. A sustentação dá às aeronaves a capacidade de decolar e se manter durante voo. Um aerofólio que se move no ar produz a sustentação, pois exerce em sua superfície inferior uma pressão maior do que na superfície superior e um aerofólio cria essa diferença de pressão devido ao seu formato. A quantidade de sustentação produzida por uma asa depende em parte de seu ângulo de ataque e de seus dispositivos de alta sustentação. (ASSY, 2004)

O mesmo ocorre com a força de Arrasto, ela é influenciada por superfícies de controle e essa força dá às aeronaves uma resistência e consequente redução da velocidade durante o voo. Esse atrito é causado pelo escoamento do fluido ao redor do aerofólio, uma vez que o fluido não se descoloca de forma igual nas partes superior e inferior do aerofólio. A sustentação também depende do ângulo de ataque.

A visualização do escoamento em perfis aerodinâmicos é utilizada para aferir os resultados obtidos pelos métodos numéricos, normalmente, resultados obtidos em softwares de simulação. A geração de um escoamento laminar é imprescindível para a visualização das linhas de corrente que são linhas desenhadas no campo de escoamento de forma que num dado instante, são tangentes à direção do escoamento em cada ponto do campo. (FOX, 2001)

No caso do projeto proposto, as forças que serão analisadas são as forças de sustentação e arrasto ao redor de um aerofólio. Além de simulações que serão realizadas no software ANSYS *Fluent* para representar as linhas de escoamento do fluido ao redor do corpo.

O objetivo das simulações é validar o resultado obtido a partir de testes no túnel de vento, portanto, o perfil aerodinâmico será trabalhado em 2 dimensões no ANSYS *Fluent*, pois apresenta uma boa aproximação e simulações em 3 dimensões são mais complicadas e exigem mais potência computacional. Para as simulações, as fórmulas utilizadas serão as seguintes:

$$c_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c} \quad (1.1)$$

$$c_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c} \quad (1.2)$$

Onde ρ representa a densidade do fluido, c_l é o coeficiente de sustentação e c_d é o coeficiente de arrasto. Para as equações acima, a representação é dada em 2 dimensões, por isso, o parâmetro de dimensão adotado é o da corda do perfil do aerofólio (c), conforme representado na Fig.1.

Para os cálculos analíticos a partir dos resultados no túnel de vento, o perfil aerodinâmico será tratado em 3 dimensões, logo as equações 1.3 e 1.4 ficam na seguinte forma:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S} \quad (1.3)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S} \quad (1.4)$$

Onde S é a área da asa finita. A imagem abaixo mostra uma representação da asa finita:

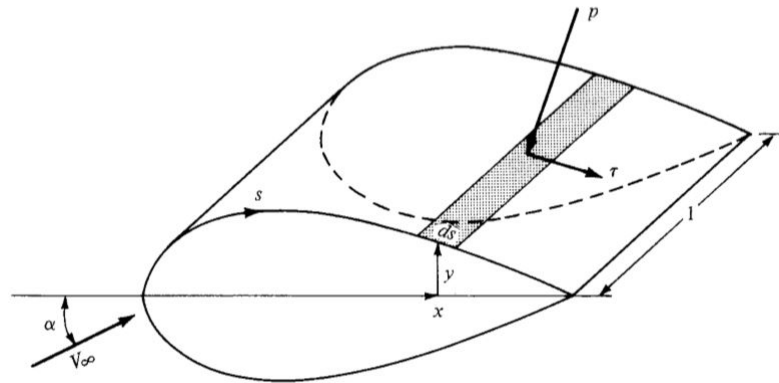


Figura 3 – Asa finita

No capítulo 7 está mais detalhado como esses cálculos foram feitos.

2 Escopo

2.1 Descrição do Produto

Balança Aerodinâmica acoplada ao túnel de vento, com monitoramento e medição das variáveis do sistema, sendo elas: força de sustentação e força de arrasto, comportamento físico das partes da estrutura física, aquisição dos dados obtidos através de equipamentos eletrônicos e análise via software.

Balanças aerodinâmicas geralmente são confeccionadas por componentes microeletrônicos ou células de carga que permitem, por meio de uma interface computacional, adquirir informações sobre os efeitos do fluxo de ar sobre o corpo de prova no momento do teste.

2.2 Premissas e Restrições

- Será possível obter um movimento mínimo do corpo sujeito ao fluxo de vento utilizando o túnel de vento menor da FGA.
- A balança aerodinâmica funcional poderá ser usada em aulas e outras atividades acadêmicas da FGA.
- O funcionamento do sistema depende da velocidade do túnel de vento.
- O túnel de vento precisa ter sua região de teste aumentada.
- O uso do túnel de vento mediante o agendamento é limitado a horário de funcionamento.
- O usuário deve posicionar o perfil a ser testado de forma correta.
- A balança aerodinâmica não possui suporte para todos os tipos de corpo de prova.

2.3 Projeto

2.3.1 Stakeholders

2.3.1.1 Equipe do Projeto

Os membros do grupo estão apresentados na tabela abaixo com suas respectivas áreas:

Estudantes	Papel	Subgrupo
Alexandre Moriya	Integrante	Eletrônica
Allecsander Silva	Integrante	Estrutura interna e externa
Erick Giffoni Felicíssimo	Integrante	Leitura de dados
Fernanda Barbosa	Integrante	Simulação Computacional
Flávio Henrique	Integrante	Custos
Gustavo Monteiro	Integrante	Eletrônica
Juliana Torri	Gerente	Simulação Computacional
Luzia Maria	Integrante	Estrutura interna e externa
Marcos Xavier	Integrante	Estrutura interna e externa
Matheus Henrique	Integrante	Eletrônica
Moacir Mascarenhas	Integrante	Leitura de dados
Pedro Falcomer	Integrante	Estrutura interna e externa
Rana Taborda	Integrante	Estrutura interna e externa
Roberto Diniz	Integrante	Eletrônica

Tabela 1 – Equipe do Projeto

2.3.1.2 Professores

Os professores são:

- Carla Tatiana Mota Anflor (Engenharia de Automotiva)
- Artur Elias de Moraes Bertoldi (Engenharia Aeroespacial)
- Paula Meyer Soares (Engenharia de Energia)
- Diogo Caetano Garcia (Engenharia Eletrônica)
- Mariana C. Bernardes Matias (Engenharia Eletrônica)
- Ricardo Ajax (Engenharia de Software)

2.4 Requisitos Funcionais

1. Determinar esforços (verticais e horizontais).
2. Determinar geometria da estrutura, que deve ser estável e segura (seção de testes, hastes e suportes).
3. Determinar perfis aerodinâmicos base que serão ensaiados e simulados.
4. Acrescentar área de teste na estrutura do túnel de vento, para que o fluxo esteja homogêneo.
5. Simular os perfis em softwares CFD.

6. Escrever as equações que serão utilizadas pelo software para determinar c_l e c_d a partir dos dados.
7. Validar os resultados encontrados experimentalmente com os da simulação.
8. Determinar o peso da estrutura.
9. Selecionar os materiais adequados.
10. Captar dados através dos sensores e convertê-los para linguagem apropriada, utilizando células de carga (CC).
11. Conduzir dados até o Arduino UNO R3 IDE 1.8.5.
12. Receber os dados de entrada via Arduino.
13. Interpretar os dados de entrada.
14. Realizar o cálculo de: sustentação, arrasto, peso e tração.
15. Exibir o resultado dos cálculos em uma tela.

2.5 Requisitos Não Funcionais

2.5.1 Funcionalidade

1. O sistema deve ser capaz de se comunicar com a placa Arduino e com o Computador (software Arduino).
2. Os componentes do sistema devem estar adequados a escala de atuação dos dados.
3. A entrada de dados no Arduino deve ser em Corrente Contínua.
4. Certificação da frequência necessária.
5. O sistema deve ser devidamente alimentado energeticamente.
6. Construir os perfis aerodinâmicos.

2.5.2 Confiabilidade

1. Fazer a leitura e a interpretação dos dados de entrada 2 vezes por segundo.
2. Exibir os dados tratados com precisão.

2.5.3 Usabilidade

1. Apresentar de forma simples os dados de saída calculados na tela.
2. Esses dados deverão estar escritos um abaixo do outro, com pelo menos 2 quebras de linha.

2.5.4 Manutenibilidade

1. Todo o código será feito de maneira componentizada, ou seja, haverá uma função para cada necessidade.
2. Construir perfis aerodinâmicos utilizando corte a laser para maior precisão.
3. Coletar com instrumentos precisos os dados do túnel de vento afim de que as simulações seja feitas com os parâmetros corretos.

2.5.5 Eficiência

1. Garantir que os dados de entrada não sejam modificados por influências externas ao túnel de vento.
2. Garantir que o Software Arduino esteja funcional e atualizado.
3. Garantir que efeitos das estruturas que não sejam o corpo de prova gerem o mínimo de interferência na análise.
4. Selecionar perfis aerodinâmicos adequados para as condições de análise.

2.5.6 Portabilidade

1. Garantir a integração eficaz da placa do Arduino com o software.

2.6 Controle e Monitoramento

O escopo do projeto é verificado durante todo o projeto, possibilitando a gerência de alterações na linha de base de escopo. Todas as mudanças do escopo solicitadas serão comunicadas e as devidas ações corretivas recomendadas serão aplicadas, sendo analisado o impacto provocado por essas mudanças no projeto. (PMBOK®, 2008)

3 Gerenciamento do Projeto

3.1 Metodologia

Para o gerenciamento do projeto foram utilizadas algumas ferramentas da metodologia ([PMBOK®, 2008](#)) e algumas de metodologias ágeis, como exemplo a divisão do cronograma em *sprints* e acompanhamento semanal das atividades.

3.2 Organização da Equipe

A equipe é composta por 14 alunos da Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama (FGA), dos cinco cursos ministrados no campus: Engenharia de Software, Energia, Aeroespacial, Automotiva e Eletrônica. A equipe é formada por dois (2) membros de Engenharia de Software, dois (2) de Energia, sete (7) de Aeroespacial, dois (2) de Automotiva e um (1) membro de Eletrônica. Para melhor distribuição das atividades do projeto a equipe foi dividida em subgrupos, de acordo com suas especializações.

3.3 Subgrupos do Projeto

- **Estrutura Externa e Interna:** Definição da estrutura externa e interna, dimensões de todo o sistema, posicionamento do corpo de prova, cálculos e estrutura do túnel de vento.
- **Custos:** Determinação dos custos gerais do projeto, tendo como base os requisitos de cada área.
- **Eletrônica:** Conexão de sensores e estudo do sistema de alimentação.
- **Leitura de Dados:** Transformar os dados em números e filtragem do processamento para o usuário.
- **Simulação Computacional:** Simulação computacional do perfil aerodinâmico e determinação perfis que serão testados na balança.

3.4 Gerenciamento de Comunicação

O gerenciamento de comunicação da equipe foi feito através das ferramentas apresentadas abaixo. Como as reuniões durante o tempo de aula não são suficientes para o

planejamento e execução dos processos definidos, a equipe optou por realizar reuniões não presenciais via internet.

- **Discord:** Ferramenta de comunicação utilizada para comunicação interna para que seja possível realizar reuniões gerais e/ou de subgrupos em horários fora dos horários de aula.
- **WhatsApp:** Ferramenta para troca de mensagem utilizada para comunicação de assuntos mais urgentes, como justificativa de ausência ou atraso de integrantes, reuniões e atividades que precisam ser executadas.
- **GitHub:** Usado para armazenar e disponibilizar os arquivos referentes ao desenvolvimento de software.
- **Overleaf:** Formatação dos documentos e compilação dos relatórios do projeto.

4 Riscos

4.1 Riscos

O controle de riscos através de um plano de gerenciamento de riscos é realizado por diferentes processos, que basicamente consiste em listar e definir uma abordagem de contorno para os mesmos. (SILVA, 2008)

Todos os integrantes do grupo são responsáveis por acompanhar os riscos do projeto, entretanto, devido a área de atuação de cada um, o grupo foi subdividido de maneira a contemplar o máximo de riscos possíveis para que fossem controlados eficientemente. A descrição dos riscos está baseada na Estrutura Analítica dos Riscos (EAR) de maneira a facilitar o entendimento de toda a equipe, como pode ser visto na Fig. 4.

4.2 Identificação dos Riscos

4.2.1 Análise SWOT

Abaixo é apresentado a análise Swot (forças, fraquezas, oportunidades e ameaças) do projeto:



Figura 4 – Análise Swot

4.3 Análise Qualitativa

4.3.1 Estrutura Analítica dos Riscos - EAR

Para minimizar os riscos no projeto além das abordagens de gerenciamento é necessário determinar margens de risco para cada etapa, ou seja, dimensionar coeficientes de segurança para todas as etapas do projeto. Dessa forma, a chance de ocorrer falhas em algum sistema é menor.

A EAR facilita a identificação dos risco em projetos. Tem por função mostrar as principais categorias de riscos para um projeto, servindo como guia para análise do contexto, da documentação e para o questionamento das partes interessadas, buscando ganho de tempo na identificação dos riscos.

Os riscos podem ser divididos nas seguintes categorias:

- **Técnicos:**

Envolvem os requisitos, a tecnologia, as ferramentas, a infraestrutura e a operação.

- **Organizacional:**

Envolvem estratégia, estrutura e prioridade de processos.

- **Externos:**

Envolvem fornecedores, legislação e condições ambientais.

- **Gerenciamento do Projeto:**

Envolvem mudanças no escopo, prazo, custos, falta e/ou inadequações dos recursos humanos, interesse das partes e comunicação.

A seguir nas tabelas abaixo são apresentados os riscos do projeto:

Descrição	Impacto	Ação
Dificuldade com a tecnologia	Muito alto	Estudo
Problemas no túnel de vento	Muito alto	Túnel de vento do Darcy
Problemas estruturais no túnel de vento	Muito alto	Modificar a estrutura
Componentes eletrônicos queimados	Médio	Rápida substituição
Erros na implementação do circuito	Médio	Revisão do circuito
Escala dos dados incompatível com os sensores	Muito alto	Substituição dos sensores

Tabela 2 – Riscos Técnicos

Descrição	Impacto	Ação
Falta de comunicação	Médio	Usar meios de comunicação
Projeto não adere a estratégia proposta	Médio	Redefinição da estratégia utilizada

Tabela 3 – Riscos Organizacionais

Descrição	Impacto	Ação
Perda de equipamentos da equipe	Alto	Buscar pareamento que minimiza tal perda
Alteração nas datas da disciplina	Alto	Redefinir as datas de entregas

Tabela 4 – Riscos Externos

Descrição	Impacto	Ação
Mudança de escopo	Muito alto	Comunicação efetiva e planejamento
Entregas Atrasadas	Alto	Definir nova data para entrega

Tabela 5 – Riscos Gerenciamento do Projeto

5 Plano de Gerenciamento de Tempo

A Estrutura Analítica do Projeto (EAP) foi atualizada com base no que já foi realizado e nas novas demandas, contemplando as seguintes fases: iniciação, planejamento, modelagem, desenvolvimento, testes e validação. Com a necessidade da remodelagem da estrutura do túnel de vento, alguns passos foram revistos, sendo exibidos na figura abaixo.

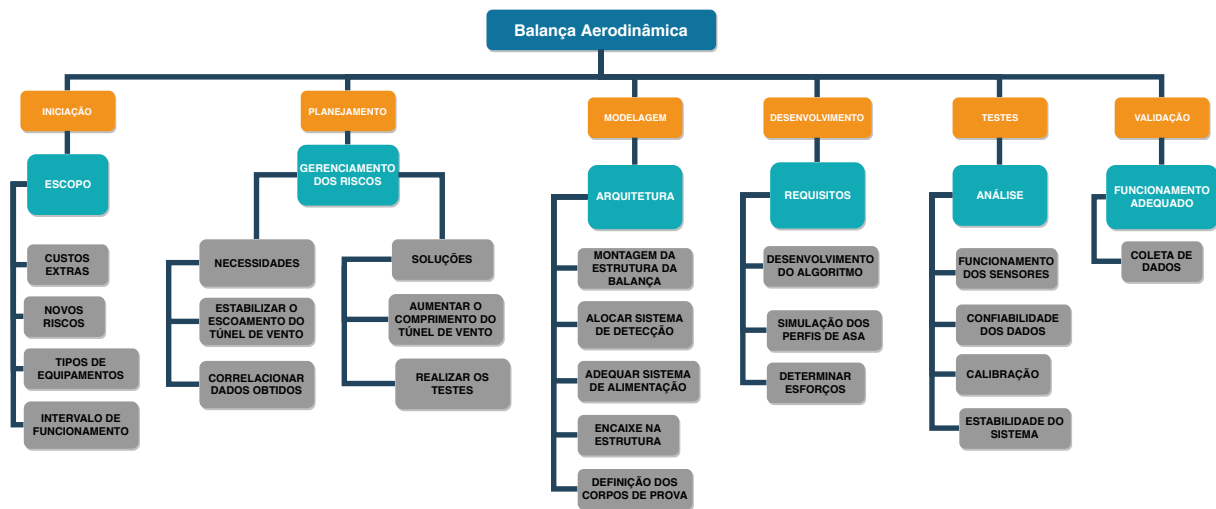


Figura 5 – EAP - Estrutura Analítica do Projeto

5.1 Cronograma

O cronograma foi escrito utilizando a EAP como entrada, e nele constam as datas das atividades previstas com seu início e fim, bem como seus responsáveis.

As atividades executadas são registradas e, para uma garantia do melhor desenvolvimento do projeto, essas tarefas podem ser comparadas com o que foi planejado, podendo assim averiguar a conformidade com o planejado, as atrasadas e as que necessitam de mudanças, essas estão sujeitas a aplicação do controle de riscos.

O cronograma de atividades do grupo para esse projeto foi baseado na metodologia ágil *Scrum*. Isso significa que o trabalho foi dividido em iterações, as chamadas *Sprints*.

- **De 10/04/2019 a 16/04/2019:**

1. Trazer a ideia definida.
2. Saber as dimensões dos túneis de vento.
3. Como fixar a balança.

4. Fazer as divisões do projeto.

• **De 17/04/2019 a 23/04/2019:**

1. Fazer EAP.

• **De 24/04/2019 a 28/04/2019:**

1. Definir os sensores para utilização, bem como possíveis softwares livres.
2. Avaliar se será necessário criar um software simples para transmitir os dados obtidos pelo sensor para o computador.
3. Entregar relatório técnico e outros documentos do Ponto de Controle 1.
4. Realizar apresentação em sala sobre o projeto.

• **De 29/04/2019 a 07/05/2019:**

1. Definição do dispositivo utilizado. Deve-se usar somente a célula de carga, somente a mola, ou os dois componentes juntos.
2. Definir como o corpo de prova deve ser fixado na haste.

• **De 08/05/2019 a 14/05/2019:**

1. Simulação dos perfis de asa e superfícies de controle para definir quais serão usados para o teste físico, bem como dimensões das superfícies de controle.

• **De 15/05/2019 a 21/05/2019:**

1. Definição do comprimento da mola e constante elástica (se necessário).
2. Definição das características da célula de carga.
3. Levantamento total de custos.
4. Recolhimento do dinheiro para aquisição dos materiais.
5. Montagem da estrutura básica da balança para os primeiros testes.

• **De 22/05/2019 a 28/05/2019:**

1. Ponto de Controle 2.

• **De 29/05/2019 a 05/06/2019:**

1. Montagem da estrutura de extensão do túnel de vento.
2. Modelagem dos corpos de prova.
3. Simulação computacional dos perfis de asa.

- **De 06/06/2019 a 12/06/2019:**

1. Montagem da estrutura de extensão do túnel de vento.
2. Modelagem dos corpos de prova.
3. Simulação computacional dos perfis de asa.
4. Calibração da balança e testes.
5. Correção de possíveis problemas.

- **De 13/06/2019 a 19/06/2019:**

1. Calibração da balança e testes.
2. Correção de possíveis problemas.

- **De 20/06/2019 a 26/06/2019:**

1. Últimos ajustes.

- **De 27/06/2019 a 03/07/2019:**

1. Ponto de Controle 3.

6 Custos

Foi feito um levantamento dos custos diretos de projeto no qual agrega todas as áreas que participam do projeto estrutura, eletrônica e aerodinâmica. O orçamento do projeto já foi estimado e já apresenta o valor total.

6.1 Custo de Estruturas

Para a parte de estruturas foi definido o uso de madeira para fazer a estrutura e os mecanismos da balança aerodinâmica, pois o material é resistente, fácil de encontrar, simples de se manusear e é de baixo custo. Na tabela abaixo é possível observar os gastos com estrutura:

Componente	Quantidade	Preço Unidade (R\$)	Preço (R\$)
Madeirite 18 mm	0,5 m ²	70,00 por m ²	35,00
Haste de madeira 1 x 1,5 cm	2 m	2,50 por m	5,00
Parafuso Francês Polido 1/4	10	1,00	10,00
Arruela Lisa Polida	16	0,13	2,08
Parafuso para madeira 4,5 X 50 mm	30	0,31	9,39
Parafuso Francês 5/16 X 6	16	0,77	12,32
Parafuso p/ madeira c/ C Philips JFX 4,5 x 16 mm	12	0,02	0,33
Arruela Polida 1/2	16	0,29	4,68
Porca 5/16	16	0,13	2,08
Tela p/ viveiro malha 1/2 fio 26 x 50 x 1.5 MT	1	12,90	12,90
Silicone Acético incolor 280G Tytan	1	16,90	16,90
Placa acrílico 17 x 100 cm	1	100,00	100,00
Cantoneira Zincada 1.1/2 DVS	12	1,20	14,40
Madeira 17 X 100 cm	3	7,14	21,42
Madeira 15 X 100 cm	4	7,14	28,58
Placas de aço 10 x 15 cm	8	2,50	20,00
Total	*	*	295,08

Tabela 6 – Custos de Estruturas

Além dos custos dos materiais, mais uma quantia de R\$ 10,00 foi necessária para dobrar as placas de aço. Essa quantia está inclusa no valor final apresentado no final deste capítulo.

6.2 Custo de Eletrônica

Para a parte de eletrônica, decidiu-se pelo uso de células de cargas em vez de molas, pois a medição é eletrônica, e com molas essa medição seria efetuada de forma manual, podendo aumentar ainda mais a margem de erro.

Componente	Quantidade	Preço da Unidade (R\$)	Preço (R\$)
Arduino UNO R3	1	44,89	44,89
Protoboard 400 pts	1	28,20	28,20
Célula de carga 50kg	2	10,55	21,10
Módulo Conv. Ampli. HX711	2	10,99	21,98
Módulo cartão micro-SD p/ Arduino	1	6,55	6,55
Células de carga 1Kg e 5Kg	2	45,95	91,90
Cabo USB	1	18,00	18,00
Total	*	*	232,62

Tabela 7 – Custos de Eletrônica

6.3 Custo de Aerodinâmica

Em aerodinâmica, decidiu-se usar mais de um perfil de asa para validar o projeto. Para que as simulações sejam mais compatíveis à realidade é necessário aumentar o tamanho do túnel de vento, logo os custos de materiais serão por conta do grupo.

Componente	Quantidade	Preço da Unidade (R\$)	Preço (R\$)
Isopor 100 X 50 cm	3	4,00	12,00
Cola tekbond	1	7,90	7,90
Impressão 3D perfil NACA0012	1	10,00	10,00
Impressão 3D perfil S1223	1	10,00	10,00
Madeira balsa 8 x 100 cm	1	21,90	21,90
Total	*	*	61,80

Tabela 8 – Custos de Aerodinâmica

Portanto, o custo total final do projeto é igual a **R\$ 599,50**.

7 Solução

Para o desenvolvimento da solução do projeto, foram criadas etapas com a finalidade de atender os requisitos previamente levantados.

7.1 Solução Estrutural

A primeira etapa consiste em aumentar o comprimento do túnel de vento, uma vez que o mesmo apresentava comprimento de 0,5m entre admissão de ar e ventilador. Com este comprimento, o escoamento de ar não era estável ao longo do plano YZ, sendo relatado pelo professor responsável que a velocidade em determinado ponto atingia 12m/s e em outro ponto distinto atingia apenas 5m/s. O objetivo é estabilizar o escoamento e permitir a coleta de dados mais próxima do ideal. Para isso, é necessário adicionar placas de madeira e acrílico substituindo a antiga seção de testes, aumentando o comprimento do túnel para 2m de comprimento. Com isso, espera-se estabilizar o escoamento para que se atinja uma velocidade mais constante em qualquer ponto da seção de testes. Além das placas de madeira compensada adicionadas, uma placa de acrílico foi adicionada para haver uma região de visualização. Nas imagens abaixo mostra o túnel de vento antes e depois de ter sua área de teste aumentada:



Figura 6 – Túnel de vento antes

Antes da alteração da seção de testes do túnel de vento, as dimensões da secção transversal era de 15 x 15cm, o comprimento igual a 50cm e a altura em relação a mesa era de 35cm. Após a alteração da seção de testes, a secção transversal permaneceu com 15cm



Figura 7 – Túnel de vento depois

de lado, o comprimento aumentou para 200cm e a altura em relação a mesa permaneceu de 35cm. Com isso, o escoamento se torna mais linear e possui variação de velocidade menor se comparada com o túnel antes da implementação e por isso, pode ser considerado a mesma velocidade em todos os pontos da secção transversal.

Após a expansão do túnel vento foi obtida uma velocidade média de 11,15 m/s, ela foi obtida através da equação de Bernoulli:

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{V_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + g \cdot z_2$$

(7.1)

Onde V é a velocidade do vento, P é a pressão a qual o fluido está submetido, ρ é a densidade do fluido, g é a aceleração da gravidade, z é a altura em que o fluido está, as variáveis com o número 1 se referem à maior secção do túnel de vento e 2 se referem à secção menor.

Para fazer esse cálculo é necessário obter uma relação entre as duas velocidade, e essa relação pode ser obtida através da equação da continuidade:

$$\rho \cdot V_1 \cdot A_1 = \rho \cdot V_2 \cdot A_2$$

(7.2)

$$V_1 = V_2 \cdot \frac{A_2}{A_1}$$

(7.3)

Substituindo a equação 7.3 na equação 7.1 se obtém as velocidades V_1 e V_2 .

Na escolha do mecanismo da balança foram consideradas e estudadas duas abordagens distintas: sistema com molas e sistema com células de carga. O uso de molas era interessante, pois permitiria a visualização dos movimentos dos corpos estudados sob a ação do escoamento, tendo valor didático, e propiciaria a obtenção de dados e coeficientes, sendo útil do ponto de vista experimental. Porém, apesar destas vantagens, este sistema era acompanhado de dois problemas: interferência dos movimentos e sensores de deformação das molas. Após vários testes preliminares com arranjos diferentes, notou-se que, sendo as forças de sustentação e arrasto interligadas pelo mecanismo, a existência de uma provocava alterações na outra e vice-versa. Ainda que a transferência de força pudesse ser mitigada e variasse com menor intensidade, esta sempre persistia, indicando a necessidade de um tratamento matemático para separação das forças, além de um arranjo de molas mais complexo. Para obter as forças pela Lei de Hooke, este mecanismo também necessitaria do desenvolvimento de sensores para medir as deformações das molas, que segundo os estudos sugeriam ser pequenas, requerendo um aparato muito sensível de medição. Uma das soluções propostas foi um sensor capacitivo, pelo princípio da capacitância variar com a distância. Porém, este tipo de solução foi descartado dada a sua complexidade, além da capacitância ser sensível a muitas variáveis e ter grande influência na balança, por ser ligada diretamente sobre a força. As células de carga, por sua vez, exigiriam um mecanismo mais simples para eliminação das interferências e separação das forças, além de dispensarem a construção de sensores, por serem prontamente integráveis a um sistema digital de processamento dos dados. Como exigência, este sistema necessitaria de ser muito firme e estável, além do cuidado com interferências externas como vibrações, por exemplo. A principal diferença entre molas e células de carga se dava no quesito do valor didático: nas células isto era praticamente eliminado, já que não há movimentos do sistema. Percebe-se que os dois tipos de mecanismo medem a mesma grandeza, porém de maneiras muito diferentes, sendo por isso importante a ponderação e atenção aos requisitos e escopo estabelecidos para escolha do sistema mais adequado, sendo necessário fazer concessões se preciso. Sendo a prioridade a qualidade na coleta de dados em detrimento da didática durante os testes, com ponderação e atenção aos requisitos e escopo do sistema, optou-se pelo sistema com células de carga, que permite a mensuração mais precisa das forças de sustentação e arrasto no túnel. Abaixo, na figura 8., tem-se a balança construída com suas partes detalhadas:

Na construção do modelo com células foram considerados os seguintes problemas: interferência dos movimentos, redução do atrito, estabilidade e rigidez da estrutura, trans-

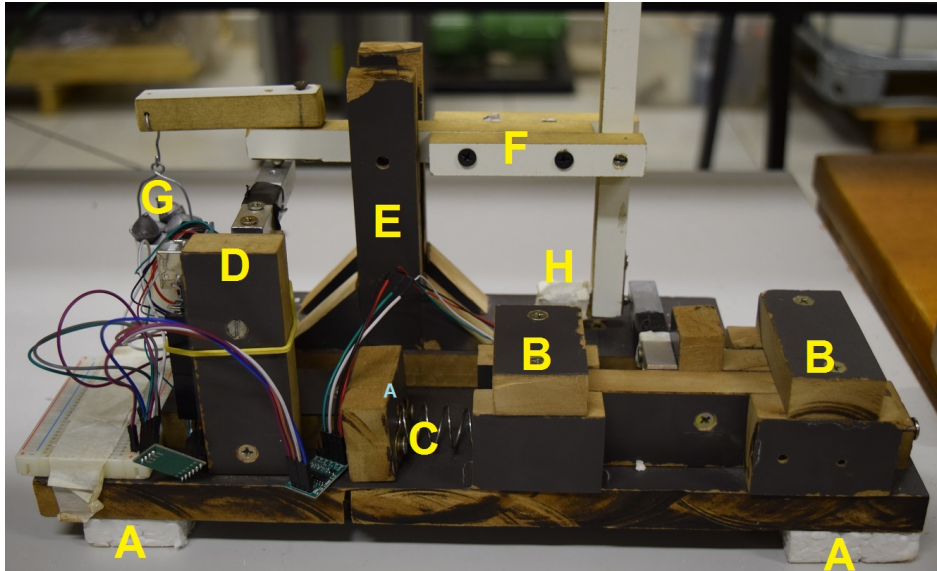


Figura 8 – Protótipo da balança construída

ferência das forças e dimensionamento das alavancas.

Na questão da interferência, que era um problema comum as molas, foram utilizados os pinos em dois locais específicos. Apesar de o modelo com célula de carga não possuir deslocamentos, os pinos são fundamentais para separar as forças advindas da interação ar-perfil no túnel. Eles impedem que forças de uma direção tenham componentes na outra, eliminando uma transferência de momento imediata.

Para minimizar o atrito, os pinos de metal foram polidos e os furos tem uma diminuta folga para permitir que a peça fique livre e ao mesmo tempo, firme. Da mesma forma, foi deixado um pequeno espaço entre as laterais das peças para evitar contatos desnecessários.

A estrutura foi fixada com parafusos e as peças posicionadas de forma que sua seção transversal resistisse melhor aos esforços aplicados, garantindo a melhor transmissão de força nas barras e haste. Foram também feitos alguns testes durante a construção para dimensionar as peças de forma a evitar que a madeira utilizada sofresse algum risco de quebra ou deflexão. Este segundo problema influenciaria na medidas das forças por armazenar energia na forma elástica. Por último o tamanho das alavancas foi calculado de modo que a multiplicação das forças se desse por um número inteiro, mitigando perdas por arredondamentos dos valores.

Dois problemas importantes resolvidos foram as estabilizações da haste vertical e da barra horizontal. Foram adicionados contrapesos em locais estratégicos para se obter a configuração desejada. Na figura 9, tem-se a solução para a haste vertical:

A imagem da esquerda mostra que a haste sem contrapeso naturalmente fica com a parte mais afastada do pino para baixo, além de não ter contato com a célula de arrasto.

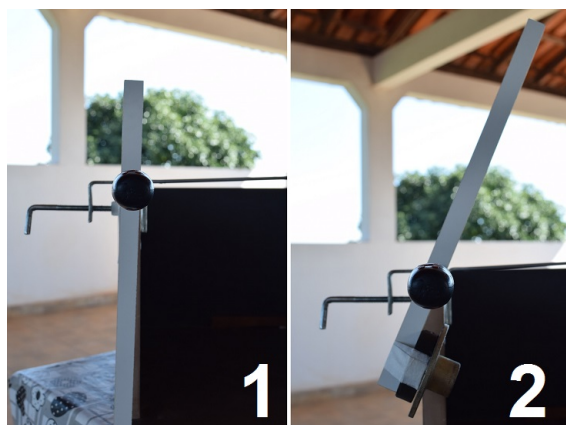


Figura 9 – Posição corrigida da haste

Na imagem da direita o problema é resolvido pela adição de uma massa que corrige a posição da haste obrigando que sua parte inferior toque a célula através da criação de uma força horizontal, que é zerada quando se inicia as medições.

Por último, para que a extremidade da barra tivesse contato com a célula da sustentação também foi adicionado um peso para correção. Na figura 10 é mostrada a correção na balança para a haste e a barra:

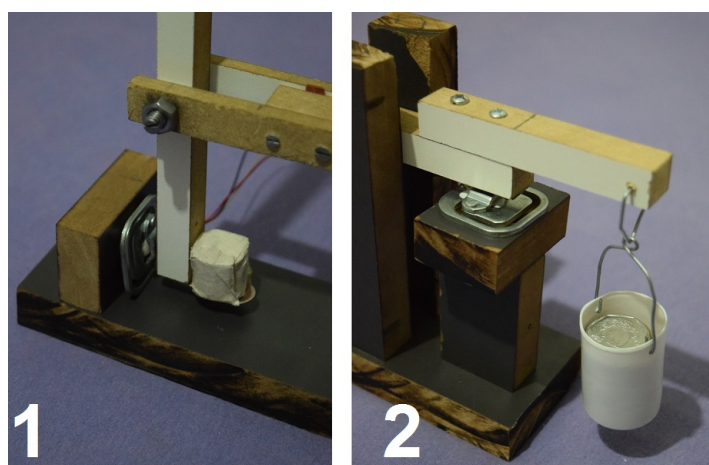


Figura 10 – Pesos atuando na balança

Na imagem da esquerda, tem-se a adição de uma massa para que a haste pressione a célula da força de arrasto, e na imagem da direita, a massa age para baixo, puxando a haste nesta mesma direção.

Após a conclusão de todos os ajustes das peças de madeira, houve a integração dos componentes eletrônicos na estrutura final. A imagem abaixo mostra o resultado:

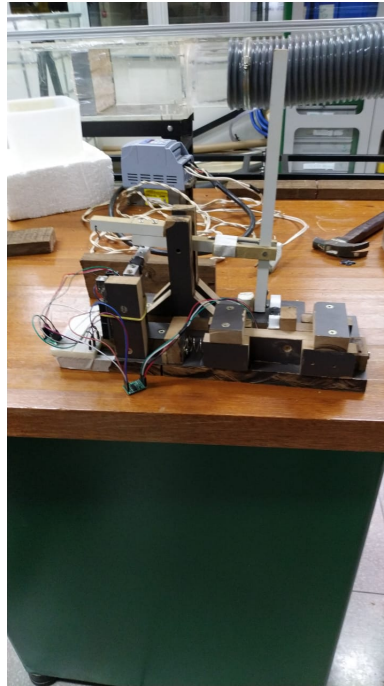


Figura 11 – Estrutura + componentes eletrônicos

7.2 Solução do Perfil Aerodinâmico

Para a primeira análise da balança no túnel de vento, construiu-se uma asa de 15cm de envergadura com o perfil aerodinâmico NACA0012, conforme na Fig. 12:



Figura 12 – Asa para teste

Na construção desta, optou-se pelo padrão de asa nervurada e empregaram-se técnicas simples de construção a partir de trabalho manual, conforme na Fig 13.

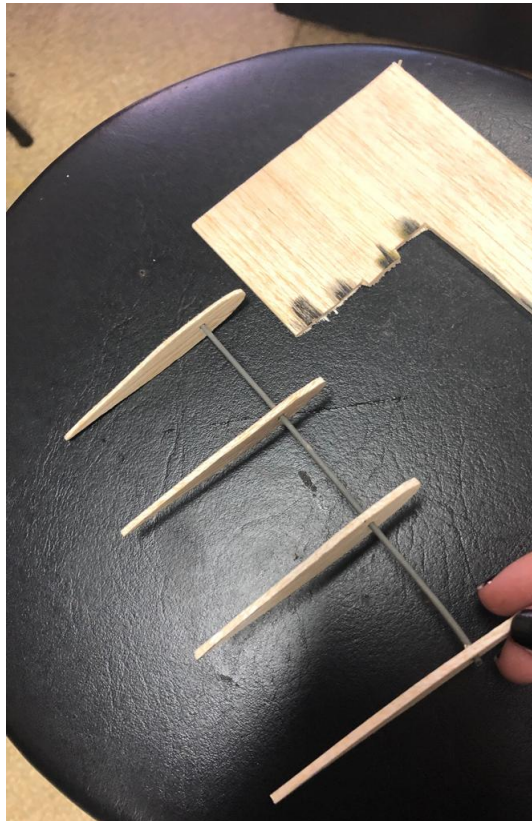


Figura 13 – Asa nervurada

É importante evidenciar a limitação imposta pelas dimensões do túnel de vento, já que estas implicam em uma asa de pequeno porte, o que, conseqüentemente, dificultou a sua construção. Dessa forma, utilizou-se um gabarito com os perfis NACA0012 com diferentes tamanhos, como na Fig 14, para analisar qual seria mais fácil de construir e que também resultasse dados de boa qualidade. Sendo assim, o tamanho escolhido foi o de 8cm de corda. A construção de superfícies hipersustentadoras para a averiguação de aumento de c_l em relação a um perfil simples se tornou inviável pelo motivo supracitado, já que essas possuem tamanho ainda menor que o do perfil de asa. Os materiais utilizados foram: Madeira balsa (3mm de espessura) para as nervuras; Folha A4 e fita adesiva para o chapeado; Cola Ciano; Arame de ferro (150mm de comprimento) para a longarina. Esses materiais foram escolhidos para garantir à asa um peso mínimo, a fim de minimizar os efeitos da sua massa na célula de carga.

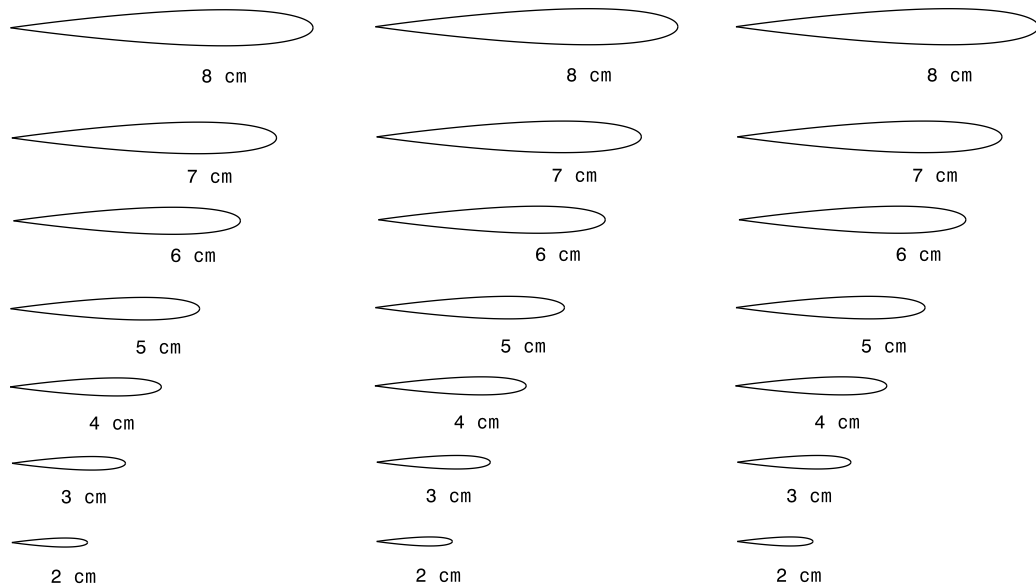


Figura 14 – Gabaritos NACA0012

Para que o experimento na balança fosse validado, segundo professores da engenharia aeroespacial, foi necessário realizar simulações computacionais nos perfis aerodinâmicos escolhidos.

Primeiramente, a simulação do aerofólio é comparada com os dados experimentais, assim é possível validar a metodologia utilizada na simulação. Para isso, o perfil aerodinâmico NACA0012 foi simulado no ANSYS *Fluent*, versão estudantil, em 2 dimensões e utilizando as mesmas condições de contorno dos dados experimentais. Conforme recomendado por professores da área e estudado em disciplinas relacionadas, utilizar essa aproximação de um perfil ser trabalhado em 2 dimensões é válida e apresenta resultados satisfatórios.

Na simulação, o objetivo é determinar o valor do coeficiente de sustentação para comparar com o coeficiente obtido experimentalmente. Como principal condição de contorno utilizada é considerar a viscosidade do escoamento, pois o resultado se aproxima da realidade. O ANSYS *Fluent* utiliza um método de aproximação do resultado por elementos finitos, por isso se divide a região de estudo em pequenos polígonos para obter uma boa solução. As imagens abaixo mostram o volume de controle utilizado assim como a malha para a simulação:

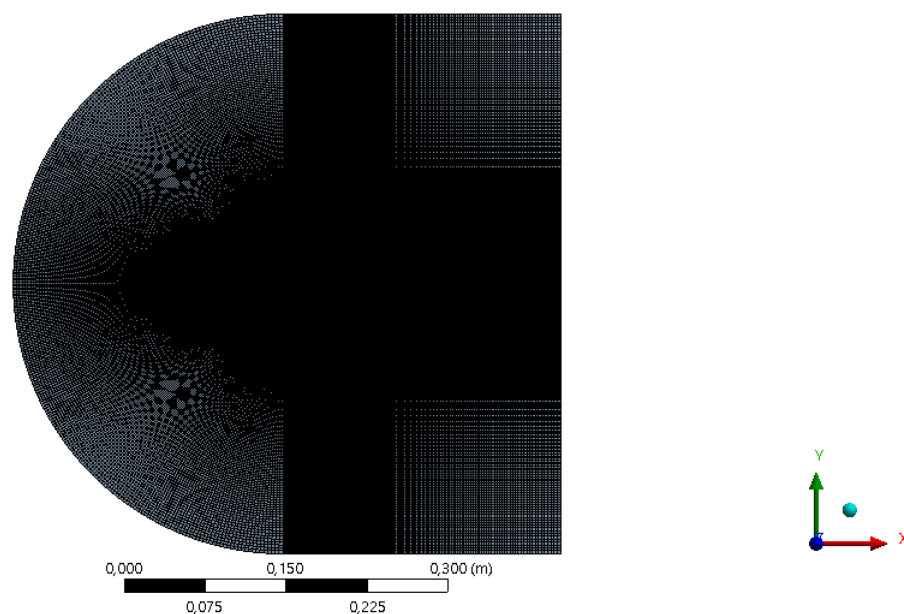


Figura 15 – Volume de controle e malha - perfil NACA0012

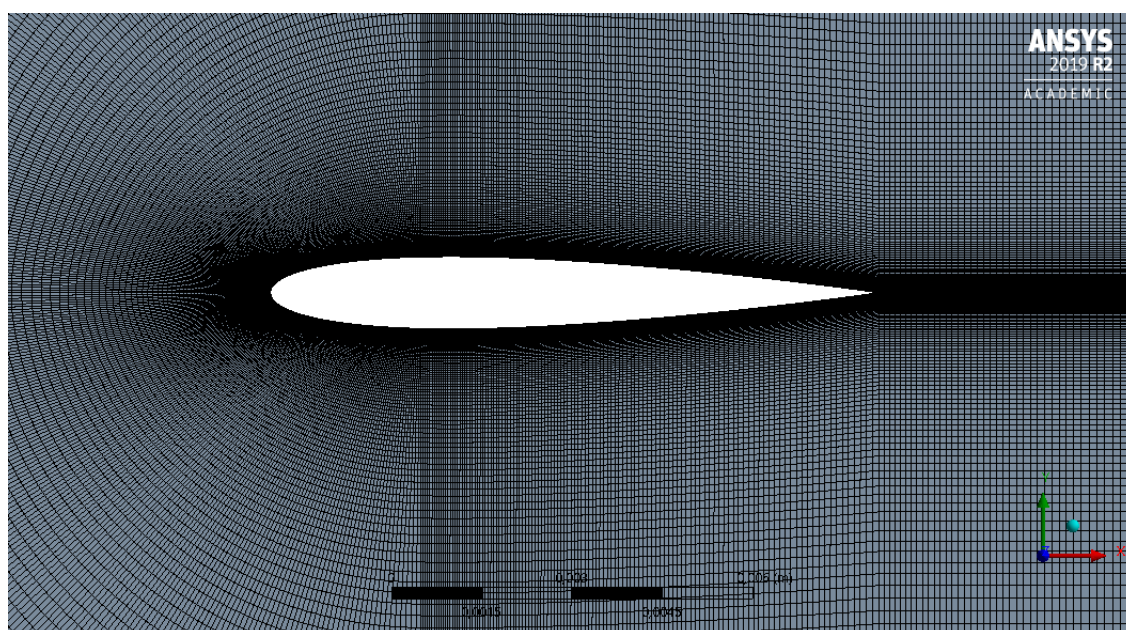


Figura 16 – Zoom da malha - perfil NACA0012

Na figura a seguir mostra uma imagem obtida no ANSYS para o escoamento da velocidade em torno do aerofólio para ângulo de zero graus:

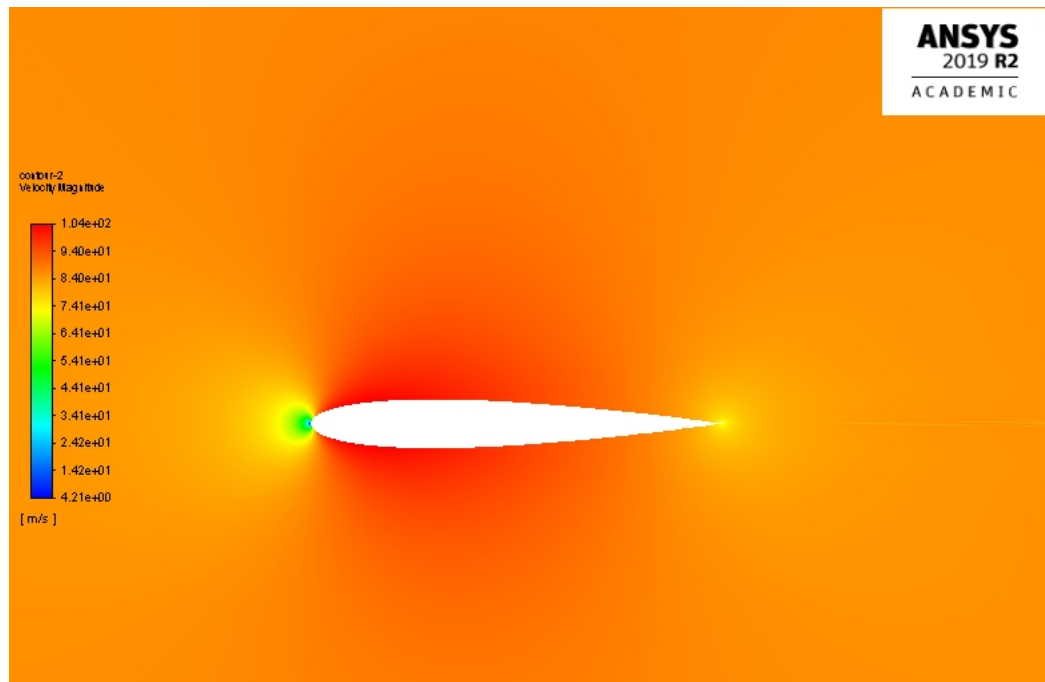


Figura 17 – Escoamento da velocidade em torno do aerofólio

Na simulação do NACA0012, alguns ângulos de ataque foram testados para comparar com os dados experimentais. Os ângulos simulados foram: 0° , 4° , 6° , 8° , 10° , 12° , 14° , 16° , 17° e 18° . A seguir mostra uma tabela com os coeficientes de sustentação para os diferentes ângulos de ataque: (ABBOTT, 1959)

Ângulo de ataque ($^\circ$)	c_l
0	-0,0004
4	0,44
6	0,67
8	0,88
10	1,15
12	1,31
14	1,52
16	1,61
17	1,58
18	1,34

Tabela 9 – Coeficientes e ângulos de ataque experimentais

A seguir, a tabela abaixo mostra os resultados obtidos pelas simulações realizadas pelo grupo:

Ângulo de ataque (°)	cl
0	-0,0003
4	0,445
6	0,660
8	0,854
10	1,012
12	1,100
14	1,204
16	1,322
17	1,411
18	1,409

Tabela 10 – Coeficientes e ângulos de ataque simulados

Após obtidos os resultados acima, um gráfico comparativo entre as duas grandezas é apresentado abaixo:

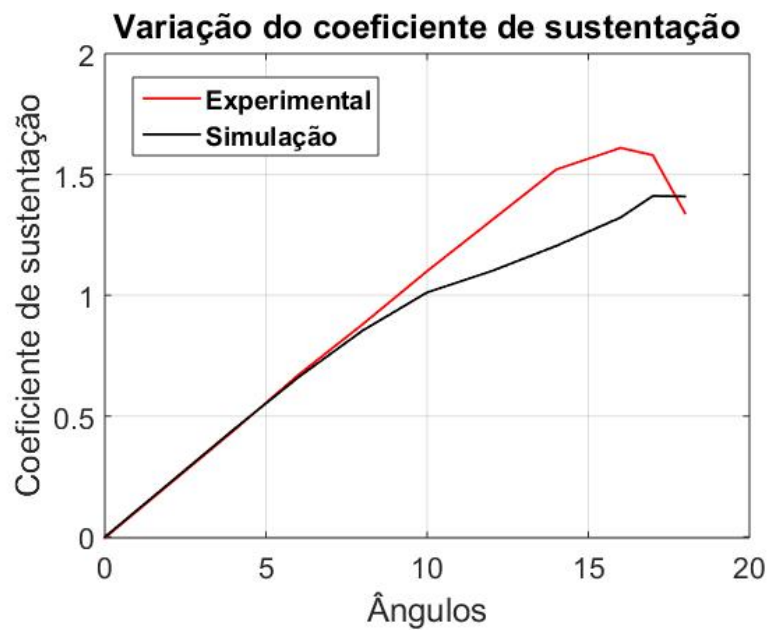


Figura 18 – Gráfico comparativo do ângulo de ataque é o coeficiente de sustentação

Com os resultados obtidos acima, é perceptível que o erro obtido é muito pequeno e os valores estão muito próximas entre si. Esse erro pequeno entre os coeficientes provoca uma alteração de casas decimais no cálculo da força de sustentação para um mesmo ângulo de ataque. Portanto, é possível concluir que a metodologia de simulação adotada pelo grupo é válida e pode ser usada para simular os perfis utilizados nos testes da balança aerodinâmica.

Portanto, para confirmar os resultados obtidos da balança aerodinâmica desenvolvida no projeto, novas simulações foram realizadas considerando a nova velocidade garantida no túnel de vento. As forças de sustentação e arrasto foram calculadas usando as equações 1.1 e 1.2 em 2 dimensões, uma vez que a simulação considera o perfil aerodinâmico em 2 dimensões. Os valores utilizados foram:

- densidade (ρ) = 1,225 kg/m³.
- velocidade (V) = 11,15 m/s.
- corda (c) = 0,08 m.
- c_l e c_d obtidos na simulação para diferentes ângulos de ataque.

Os resultados numéricos obtidos para as forças por unidade de comprimento foram os seguintes para variações no ângulo de ataque:

Ângulo de ataque (°)	L	D
0	$2,71 \cdot 10^{-7}$	$1,007 \cdot 10^{-3}$
5	0,269	0,0194
10	0,4926	0,076125

Tabela 11 – Forças e ângulos de ataque simulados para condições do túnel

Em seguida, os resultados acima foram comparados com os resultados obtidos experimentalmente por testes feitos pelo grupo no túnel de vento da FGA. O objetivo desta comparação é mostrar que os resultados obtidos na balança desenvolvida no projeto está de acordo com o esperado, visto que a simulação é adequada para o projeto. Os resultados experimentais são mostrados abaixo:

Ângulo de ataque (°)	L	D
0	0,0258	0,0690
5	0,6357	0,0964
10	1,0176	0,1401

Tabela 12 – Forças e ângulos de ataque medidos na balança desenvolvida no projeto

A partir dos resultados acima, é possível perceber que alguns fatores precisam ser levados em consideração no momento de realização das medições, pois isso faz com que haja erros em comparação com a simulação, são eles:

- o escoamento está próximo do ideal, mas ainda com algumas variações.
- vibração na superfície de apoio onde o túnel está apoiado.
- erro associado a calibração.
- superfície interna do túnel próxima da ideal, mas ainda com rugosidades.
- erro associado a junção da estrutura do túnel.
- erro associado ao ajuste manual do ângulo.
- erro associado à diferença de valores padrões (utilizados nas fórmulas e simulações) e de valores reais.

Portanto, apesar de haver medidas distoantes entre as simulações e os testes físicos da balança, os valores da balança aerodinâmica são mais condizentes com a realidade e com erros já mencionados acima. Assim, o equipamento pode ser usado para testes em outros perfis aerodinâmicos.

7.3 Solução Eletrônica

Para captação dos dados, utilizou-se sensores de peso, instrumento feito de ligas de alumínio, também conhecidos como células de cargas. O desempenho de uma célula de carga (sensor de peso) de 1kg é simples: na parte central da célula há uma superfície sensível que faz a detecção da carga. É importante lembrar que não é exigido que o peso

da carga seja aplicado exatamente sobre essa superfície central para que as leituras sejam realizadas. As células de cargas utilizadas são compostas de uma ponte resistiva que varia em função do peso da carga aplicada, logo a saída de sinal para o microcontrolador que vai realizar as leituras varia de acordo com o peso da carga sobre a célula.

Para o projeto, utilizou-se 2 células de carga: uma de 1kg e outra de 5kg. A primeira foi usada para medir o arrasto enquanto a segunda foi usada para medir a sustentação, pois sabe-se que a sustentação é maior que a força de arrasto. As imagens abaixo mostram as células de carga utilizadas:

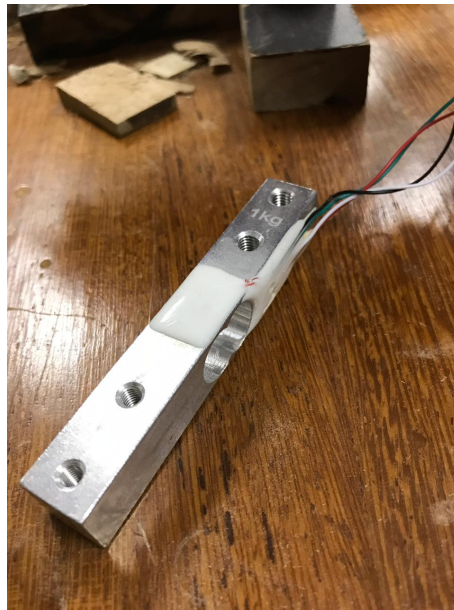


Figura 19 – Célula de carga de 1kg

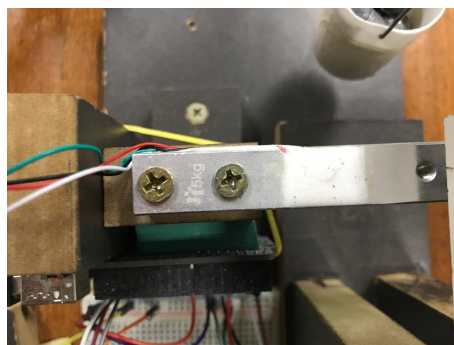


Figura 20 – Célula de carga de 5kg

A protoboard foi utilizada com a intenção de poder realizar a conexão de dois módulos amplificadores dos sinais vindos dos sensores. É necessário pelo fato do microcontrolador utilizado, o Arduino, conter apenas um pino de saída de 5V, que é a tensão de operação apropriada para o módulo. Com a protoboard, torna-se possível ligar esse pino de 5V do Arduino a um ponto comum e, a partir desse ponto, conectar a quantidade de módulos necessária. Nas imagens abaixo, mostra o circuito montado na protoboard e o Arduino utilizado:

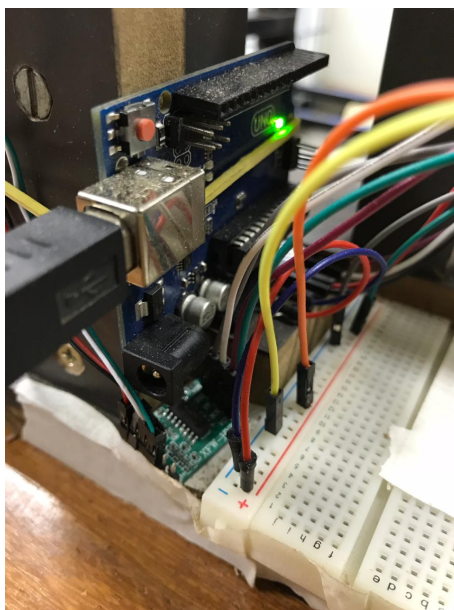


Figura 21 – Circuito montado na protoboard

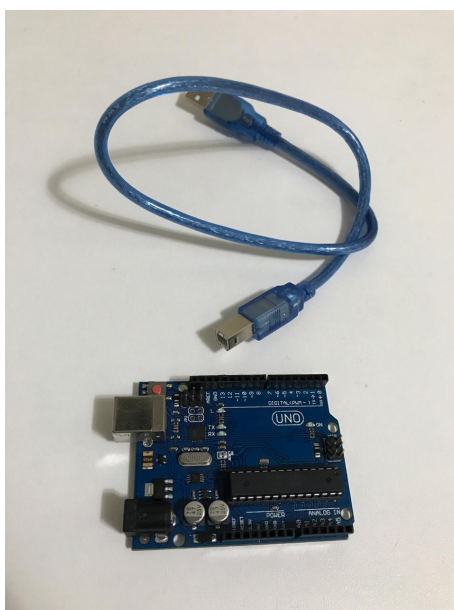


Figura 22 – Microcontrolador Arduino UNO utilizado

Como a tensão enviado pela célula é relativamente baixa, torna-se fundamental o uso de um amplificador de sinal, o módulo HX711 ADC 24 bit, cuja tensão de operação está na faixa de 4,8 à 5,5 VDC e corrente de operação de 1,6mA. Dessa forma, a porta analógica da plataforma micro-controlada, o Arduino, pode realizar a leitura correta dos dados. Para o projeto, foi necessário dois módulos HX711 ADC 24 bit, pois o objetivo é determinar duas forças aerodinâmicas, sendo que cada célula de carga necessitaria de um módulo. Assim, o sinal captado de cada sensor é amplificado para conhecer os valores exatos dessas forças. A imagem abaixo mostra esse módulo:

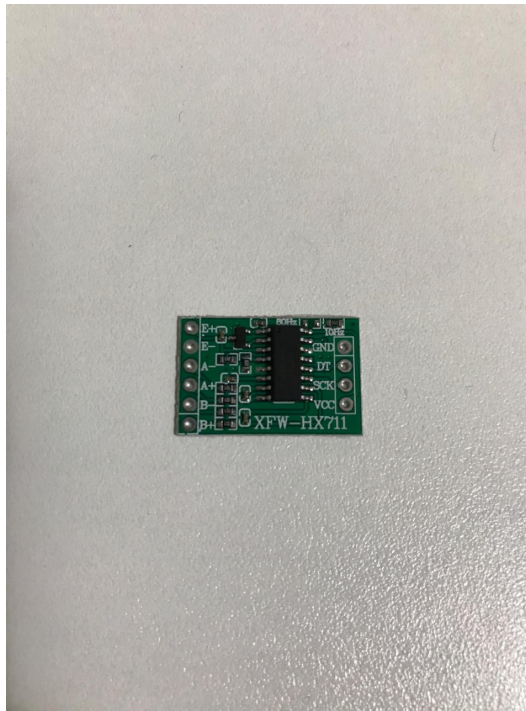


Figura 23 – Módulo amplificador de sinal HX711

A figura abaixo representa o esquemático elétrico do circuito, como dito anteriormente, inclui o microcontrolador Arduino, a protoboard, dois módulos amplificadores e as duas células de carga, de 1kg e de 5kg.

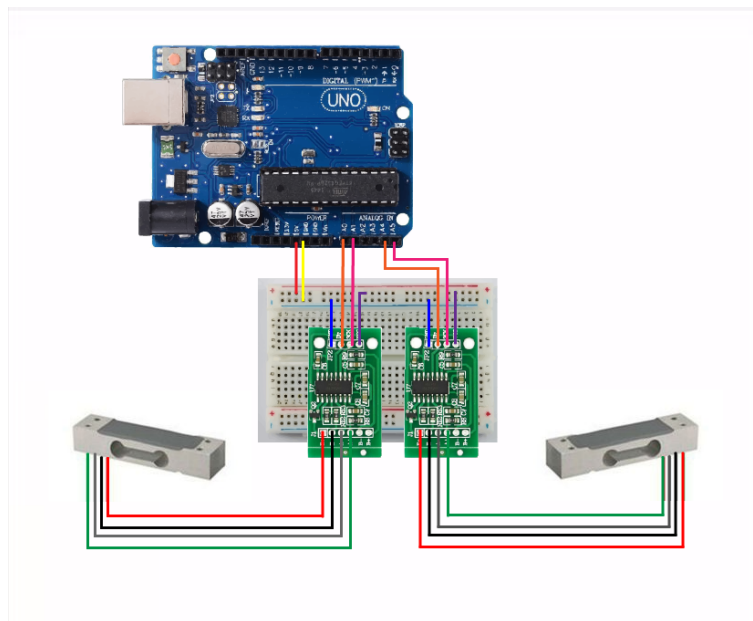


Figura 24 – Esquemático do circuito

O circuito foi montado para fazer com que cada uma das células de carga permanesse fixa no local onde serão medidos as forças de arrasto e de sustentação da asa, como mostrado na figura abaixo.

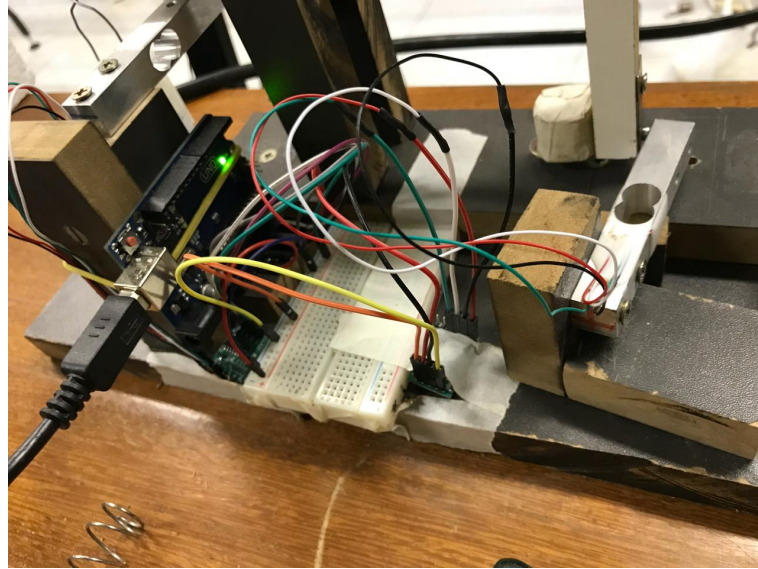


Figura 25 – Circuito montado na estrutura da balança

7.4 Solução Software

7.4.1 O processo

A partir do exposto anteriormente, foi utilizado o software Arduino para receber os dados provenientes das células de carga, após serem amplificados. O primeiro passo é fazer uma calibragem das balanças com o intuito de corrigir possíveis erros de medida, conforme mostrado em 1. Feito isso, utilizou-se uma sequência de funções para conseguir, a partir dos dados recebidos, fazer os cálculos necessários de saída de dados, como o arrasto e a sustentação, evidenciado em 2. Com isso, os cálculos são apresentados de maneira simples na tela do computador, e o processo se repete até que seja feita uma interrupção, mostrado no passo 3.

1. Calibragem das balanças

O processo de calibrar uma balança/célula de carga não é muito complicado. Para isso, foi feito e utilizado um código específico (*calibracao.ino*) na plataforma Arduino.

Primeiramente, colocou-se ambas células de carga na mesma escala, utilizando o método *set_scale()* da biblioteca do amplificador HX711. Feito isso, zerou-se as marcações iniciais das duas balanças a partir da função *tare()* da mesma biblioteca.

Todo código feito na plataforma Arduino possui duas funções principais: *setup()* e *loop()*. Os passos descritos anteriormente foram feitos na primeira função, o que significa que eles só acontecem uma vez a cada execução do código.

Dando continuidade, foram adicionados dois pesos conhecidos em cima de cada célula de carga. Depois, usou-se novamente a função *set_scale()* para colocar as duas células em escalas corretas, de acordo com os pesos que foram inseridos em cima delas. Para isso, passou-se como parâmetro da função acima um fator de correção para cada balança. Na tela do computador, consegue-se mostrar as massas medidas pelas células de carga em tempo de execução do código, e a partir disso é possível aumentar ou diminuir, via teclado, os fatores de correção até que os valores de massa mostrados na tela estejam condizentes com os pesos conhecidos que foram colocados em cima das balanças. Todo esse processo aconteceu dentro da função *loop()* e está exemplificado pela imagem a seguir:

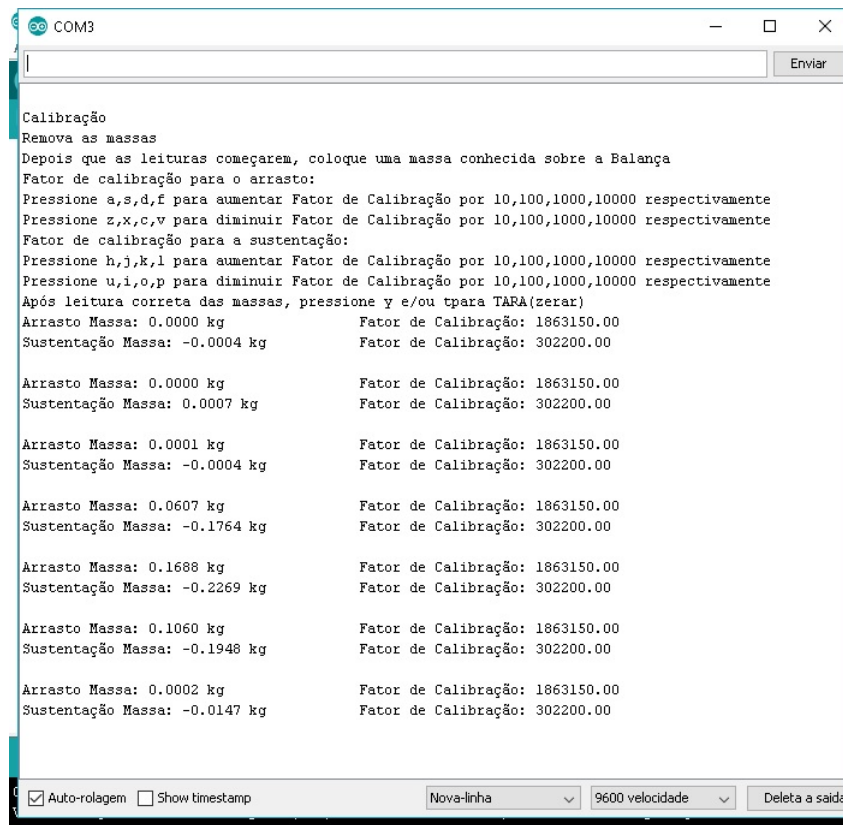


Figura 26 – Calibrando as células de carga

Observação : no momento em que os valores de massa mostrados na tela condizem com os pesos conhecidos que foram colocados em cima das células, são anotados os valores dos fatores de calibração e o programa é interrompido. Esses valores são usados na próxima etapa.

2. Receber os dados das células de carga para fazer os cálculos

Depois de calibrar as balanças na etapa anterior, foram anotados os valores finais dos fatores de correção para que as células de carga meçam corretamente. Assim, adicionou-se esses valores no código principal da solução de software : *balança_aero.ino*.

A partir disso, com o túnel de vento ligado e com o perfil de asa devidamente posicionado, o programa usa funções nativas da biblioteca do amplificador HX711 para pegar os valores de massa medidos pelas duas células de carga da Balança Aerodinâmica. A partir dessas medições, o código calcula as forças e os coeficientes de arrasto e de sustentação do perfil de asa que está sendo testado no túnel de vento.

Feito isso, basta prosseguir para o próximo passo.

3. Apresentando os dados calculados na tela do computador

Sendo assim, visto que a parte mais complicada da solução de software foi o tópico 1 e o 2, mantém-se o programa *balança_aero.ino* rodando e, mostra-se os valores apresentados na tela do computador. São eles:

- massa medida pela célula de carga de arrasto, em kg.
- massa medida pela célula de carga de sustentação, em kg.
- força de sustentação medida pela célula de carga, em N.
- força de arrasto medida pela célula de carga, em N.
- coeficiente de arrasto.
- coeficiente de sustentação.

A imagem a seguir exemplifica esse processo:

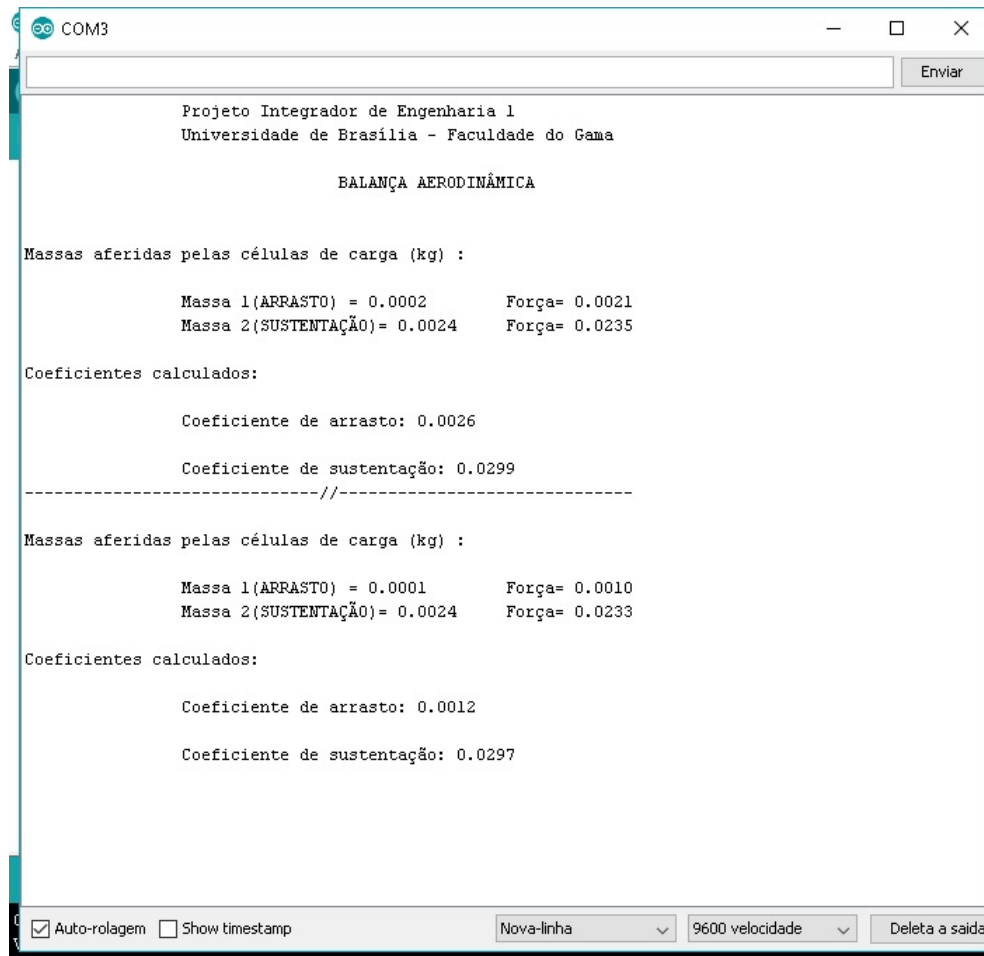


Figura 27 – Apresentação dos dados calculados

7.4.2 Como utilizar a solução de software

- **Requisitos:**

- Arduino IDE instalado.
- Arquivos *calibracao.ino* e *balanca_aero.ino*, disponibilizados em anexo e em (GIFFONI; MASCARENHA, 2019).
- Ter biblioteca HX711 baixada.
- Massa conhecida.

- **Como Utilizar:**

Em cada algoritmo importe a biblioteca "HX711.h".

1. É necessário encontrar os fatores de calibração para que as medições tenham precisão.

Abra o arquivo *calibracao.ino* e o execute. Após iniciar as medições, adicione a massa conhecida e altere o fator de calibração até que o valor retornado seja próximo à massa conhecida.

Para o fator de calibração da força de arrasto, utilize:

As teclas "a", "s", "d", "f" são responsáveis por aumentar o fator em +10, +100, +1000, +10000, respectivamente.

As teclas "z", "x", "c", "v" diminuem o fator em -10, -100, -1000, -10000, respectivamente.

A tecla "t" é responsável por zerar a balança.

Para o fator de calibração da força de sustentação, utilize:

As teclas "h", "j", "k", "l" são responsáveis por aumentar o fator em +10, +100, +1000, +10000, respectivamente.

As teclas "u", "i", "o", "p" diminuem o fator em -10, -100, -1000, -10000, respectivamente.

A tecla "y" é responsável por zerar a balança.

Após encontrar os valores dos fatores, anote-os porque serão utilizados no algoritmo *balanca_ero.ino*.

2. No algoritmo *balanca_ero.ino* substitua os valores dos fatores encontrados anteriormente.

Inicie o código com o túnel de vento **desligado**. Após iniciar as medições, ligue o túnel.

Os algoritmos utilizados (*calibracao.ino* e *balanca_ero.ino*) são adaptações dos códigos disponíveis em ([ELETROGATE, 2018](#)).

HX711.h disponível em ([BOGDE, 2007](#)).

7.5 Solução Energia

- **Para a balança:** os próprios equipamentos da balança já fornecem a energia. Como utilizou-se o Arduino e ele será conectado a um notebook ou a um computador, o Arduino se alimenta da energia advinda do computador através de uma entrada USB 1.1.
- **Para o circuito:** a balança possui um sistema piezoelétrico o qual gera energia através de energia mecânica de compressão do componente célula de carga, sendo este o suprimento energético o necessário para envio do sinal elétrico que será lido no sistema de detecção.
- **Para os testes em bancadas:** vale ressaltar o gasto com túnel de vento que sempre estará presente e varia de túnel para túnel. Utilizou-se como referência o túnel que encontra-se no laboratório de termofluidos da FGA, campus da Universidade de Brasília.

- **Verificação da viabilidade de gasto energético:** o consumo energético, conforme apresentado na tabela abaixo, é focado no túnel de vento que se apresenta como único componente do sistema que precisa de fonte de energia vinda da rede elétrica da Universidade. O gasto energético da composição é pequeno e plenamente viável tendo gasto anual, segundo estimativas baseadas na demanda, próximo a 1kWh. Em relação ao Arduino, seu consumo energético foi desprezado por representar-se insignificante.

Potência(W)	Duração média(h)	Testes p/ semana	Consumo (Wh/ano)
110	0,1	3	1056

Tabela 13 – Gasto Energético

Considerou-se a potência máxima que o túnel de vento consegue trabalhar e um ano letivo de 64 semanas.

Referências

ABBOTT, I. H. *Theory of Wing Sections - Including a Summary of Airfoil Data*. 1 ed. Dover Publications, Inc. New York, 1959. Citado na página 35.

ANDERSON, J. *Fundamentals of Aerodynamics*. 5 ed. New York: McGraw-Hill, 2010. Citado na página 9.

ASSY, T. *Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações*. Editora LTC. 2ª Ed. Rio de Janeiro, 2004. Citado na página 10.

BOGDE. An arduino library to interface the avia semiconductor hx711 24-bit analog-to-digital converter (adc) for weight scales. 2007. Disponível em: <<https://github.com/bogde/HX711>>. Citado na página 47.

ELETROGATE. Balança digital com arduino e célula strain gauge – revisada. 2018. Disponível em: <<http://blog.eletrogate.com/balanca-digital-com-arduino-aprenda-a-usar-a-celula-de-carga/>>. Citado na página 47.

FOX, R. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. LTC, Rio de Janeiro, 2001. Citado na página 10.

GIFFONI, E.; MASCARENHA, M. Balança aerodinâmica. 2019. Disponível em: <https://github.com/ErickGiffoni/balanca_aerodinamica>. Citado na página 46.

PMBOK®. *Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK®)*. [S.1.]: Project Management Institute, Inc. EUA, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

SILVA, M. *Gerenciamento de Riscos em Projetos: Uma comparação entre PMBOK e a ISO-31000*. [S.1.]: Project Management Institute, Inc. EUA, 2008. Citado na página 18.

SMITH, e. a. *Vehicle Wind Tunnel Balance*. [S.1.], 2007. Citado na página 8.

8 Anexos

Abaixo encontra-se alguns anexos importantes para esse trabalho, como, por exemplo, os códigos utilizados para a solução de software.

Table of contents

[1. calibracao.ino](#)

[2. balanca_aero.ino](#)

calibracao.ino

Esse código é usado para calibrar as duas células de carga a partir de massas conhecidas.

```
#include "HX711.h" // Biblioteca HX711

//Pinos de dados
#define DOUT1 A0
#define DOUT2 A4
//pinos de clock
#define CLK1 A1
#define CLK2 A5
HX711 ARRASTO_HX711; // define instancia balança HX711
HX711 SUSTENTACAO_HX711;

float fator_de_calibracao_arrasto = 1863150.00; // fator de calibração para teste inicial
float fator_de_calibracao_sustentacao = 302200.00;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // monitor serial 9600 Bps
  ARRASTO_HX711.begin(DOUT1, CLK1);
  SUSTENTACAO_HX711.begin(DOUT2, CLK2);

  Serial.println("\nCalibração");
  Serial.println("Remova as massas");
  Serial.println("Depois que as leituras começarem, coloque uma massa conhecida sobre a Balança");
  Serial.println("Fator de calibração para o arrasto:");
  Serial.println("Pressione a,s,d,f para aumentar Fator de Calibração por 10,100,1000,10000 respectivamente");
  Serial.println("Pressione z,x,c,v para diminuir Fator de Calibração por 10,100,1000,10000 respectivamente");
  delay(3000);
  Serial.println("Fator de calibração para a sustentação:");
  Serial.println("Pressione h,j,k,l para aumentar Fator de Calibração por 10,100,1000,10000 respectivamente");
  Serial.println("Pressione u,i,o,p para diminuir Fator de Calibração por 10,100,1000,10000 respectivamente");
  Serial.println("Após leitura correta das massas, pressione y e/ou t para TARA(zerar) ");
  delay(3000);

  ARRASTO_HX711.set_scale(); // configura a escala da Balança
  SUSTENTACAO_HX711.set_scale();

  ARRASTO_HX711.tare();
  SUSTENTACAO_HX711.tare();
}

void loop()
{
  ARRASTO_HX711.set_scale(fator_de_calibracao_arrasto); // ajusta fator de calibração
  SUSTENTACAO_HX711.set_scale(fator_de_calibracao_sustentacao);

  Serial.print("Arrasto Massa: ");
  Serial.print(ARRASTO_HX711.get_units(3),4);
  Serial.print(" kg");
  Serial.print("\t\tFator de Calibração: "); // imprime no monitor serial
  Serial.println(fator_de_calibracao_arrasto); // imprime fator de calibração
  Serial.print("Sustentação Massa: ");
  Serial.print(SUSTENTACAO_HX711.get_units(3),4);
  Serial.print(" kg");
  Serial.print("\t\tFator de Calibração: "); // imprime no monitor serial
  Serial.println(fator_de_calibracao_sustentacao); // imprime fator de calibração
  Serial.print("\n");
  delay(2000); // atraso de 2 segundos

  if (Serial.available()) // reconhece letra para ajuste do fator de calibração
  {
    char temp = Serial.read();

    // ARRASTO
    if (temp == '+' || temp == 'a') // a = aumenta 10
      fator_de_calibracao_arrasto += 10;
    else if (temp == '-' || temp == 'z') // z = diminui 10
```

Dossie Document

03/07/2019 16:23

```

        fator_de_calibracao_arrasto -= 10;
    else if (temp == 's') // s = aumenta 100
        fator_de_calibracao_arrasto += 100;
    else if (temp == 'x') // x = diminui 100
        fator_de_calibracao_arrasto -= 100;
    else if (temp == 'd') // d = aumenta 1000
        fator_de_calibracao_arrasto += 1000;
    else if (temp == 'c') // c = diminui 1000
        fator_de_calibracao_arrasto -= 1000;
    else if (temp == 'f') // f = aumenta 10000
        fator_de_calibracao_arrasto += 10000;
    else if (temp == 'v') // v = diminui 10000
        fator_de_calibracao_arrasto -= 10000;
    else if (temp == 't')
        ARRASTO_HX711.tare(); // t = zera a Balança

// SUSTENTAÇÃO
    else if (temp == 'u') // z = diminui 10
        fator_de_calibracao_sustentacao -= 10;
    else if (temp == 'j') // j = aumenta 100
        fator_de_calibracao_sustentacao += 100;
    else if (temp == 'i') // i = diminui 100
        fator_de_calibracao_sustentacao -= 100;
    else if (temp == 'k') // k = aumenta 1000
        fator_de_calibracao_sustentacao += 1000;
    else if (temp == 'o') // o = diminui 1000
        fator_de_calibracao_sustentacao -= 1000;
    else if (temp == 'l') // l = aumenta 10000
        fator_de_calibracao_sustentacao += 10000;
    else if (temp == 'p') // p = diminui 10000
        fator_de_calibracao_sustentacao -= 10000;
    else if (temp == 'y')
        SUSTENTACAO_HX711.tare();
}
}

```

balanca_aero.ino

Esse é o código principal da solução de software. A partir dele obtém-se as massas medidas pelas células de carga, bem como os valores das forças de arrasto e de sustentação, dentre outros, conforme os objetivos do trabalho.

```

#include "HX711.h"

//pinos de entrada
#define pino_entrada1 A0
#define pino_entrada2 A4
//pinos de clock
#define pino_clock1 A1
#define pino_clock2 A5

float fator_de_calibracao1 = 1863150.00;
float fator_de_calibracao2 = 390200.00;

HX711 balanca_aero_arrasto;
HX711 balanca_aero_sustentacao;

//dados para as funcoes de arrasto e de sustentacao
double fg = 9.81; // m/s^2 - aceleracao gravitacional
double corda = 0.079; // m - 8 cm
double densidade_do_fluido = 1.225/1.11; // kg/m^3
float velocidade = 11.15; // m/s
double velocidade_2 = velocidade*velocidade; // m^2/s^2 - velocidade ao quadrad
float envergadura = 0.145;
float massal = 0.0, massa2 = 0.0;

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    balanca_aero_arrasto.begin(pino_entrada1, pino_clock1);
    balanca_aero_sustentacao.begin(pino_entrada2, pino_clock2);

    Serial.print("\t\tProjeto Integrador de Engenharia 1\n");
    Serial.print("\t\tUniversidade de Brasília - Faculdade do Gama\n\n");
    Serial.print("\t\t\tBALANÇA AERODINÂMICA\n\n");
    balanca_aero_arrasto.set_scale();
    balanca_aero_sustentacao.set_scale();

    //define o fator de calibracao
}

```

Docsie Document

03/07/2019 16:23

```

    balanca_aero_arrasto.tare();
    balanca_aero_sustentacao.tare();
}

void loop() {
    //zera a balanca
    balanca_aero_arrasto.set_scale(fator_de_calibracao1);
    balanca_aero_sustentacao.set_scale(fator_de_calibracao2);

    //get_units realizara a media dos 15 valores de massas medidas
    massa1 = balanca_aero_arrasto.get_units(15);
    massa2 = balanca_aero_sustentacao.get_units(15);
    massa1 = abs(massa1);
    massa2 = abs(massa2);

    Serial.print("Massas aferidas pelas células de carga (kg) :\n\n");
    Serial.print("\t\tMassa 1 (ARRASTO) = ");
    Serial.print(massa1,4);
    Serial.print("\t Força= ");
    Serial.println(massa1*fg,4);
    Serial.print("\t\tMassa 2 (SUSTENTAÇÃO)= ");
    Serial.print(massa2,4);
    Serial.print("\t Força= ");
    Serial.print(massa2*fg,4);
    Serial.print("\n\n");

    //chamada das funcoes
    double sustentacao, arrasto ;
    sustentacao = coef_sustentacao(massa2);
    arrasto = coef_arrasto(massa1);

    //imprime os coeficientes
    Serial.print("Coeficientes calculados:\n\n");
    Serial.print("\t\tCoeficiente de arrasto: ");
    Serial.println(arrasto,4);
    Serial.print("\n\t\tCoeficiente de sustentação: ");
    Serial.println(sustentacao,4);
    //Atraso de 5,5 segundos
    delay(5500);
    Serial.print("-----//-----\n\n");
}

double coef_sustentacao(double massa_da_celula){
    return ((massa2*fg)/((0.5)*(densidade_do_fluido)*(velocidade_2)*(corda)*(envergadura)));
}

double coef_arrasto(double massa_da_celula){
    return ((massa1*fg)/((0.5)*(densidade_do_fluido)*(velocidade_2)*(corda)*(envergadura)));
}

```

[Back to top](#)Made with [Docsie.io](#)