

# Sistema de coordenadas para posicionamento de instrumentos de medição em um túnel de vento

Alexandre Marques Baldez Junior - abaldezjr@gmail.com  
Rodrigo de Souza Torma - rstorma@hotmail.com



Universidade Federal do Rio Grande  
Engenharia Mecânica empresarial

Orientador: Prof. Dr. Gustavo da Cunha Dias  
Co-Orientador: Prof. Me. Letieri Rodrigues de Ávila

Rio Grande, 4 de junho de 2021

Roteiro

## Introdução

## Referencial teórico

## Metodologia

## Resultados e discussão

## Considerações finais



Roteiro

Introdução

Apresentação do tema

## Apresentação do problema

## Justificativa

## Objetivos

## Referencial teórico

Metodologia

## Resultados e discussão

## Considerações finais



## Introdução



## Referencial teórico



## Metodologia



## Resultados e discussão



## Considerações finais



Apresentação do tema

# Apresentação do tema

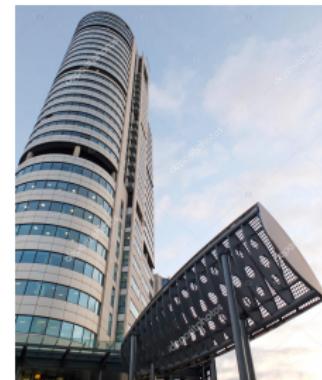
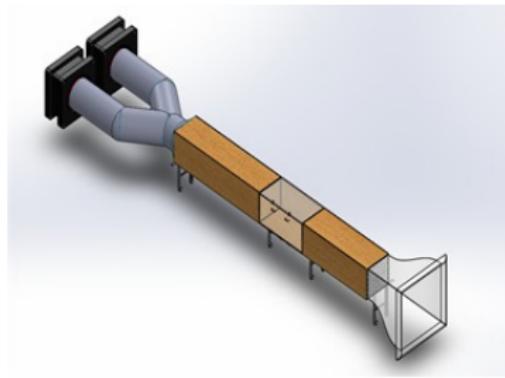


Figura: Bridgewater Place - Leeds  
Inglaterra

Apresentação do tema

## Túnel de vento

Os túneis de vento são as bancadas de testes para estudos de escoamento de ar, onde é possível simular cenários e avaliar a interação do fluido e estrutura.



## Apresentação do tema

## Instrumentos de medição

Uma das grandezas obtidas é a velocidade do fluido, a qual é medida por instrumentos como tubo de Pitot.



## Apresentação do problema

## Apresentação do problema

O posicionamento dos instrumentos dentro do túnel de vento é realizado de forma manual, causando uma baixa repetibilidade e menor precisão.



## Introdução

○  
○○○  
○  
●  
○

## Referencial teórico

○  
○  
○  
○○

## Metodologia

○  
○○○○○○○○○○  
○○○○○○○○○○○○  
○○○○

## Resultados e discussão

○  
○○○○○○○○○○○○  
○○○○○

## Considerações finais

○  
○○  
○○○  
○

Justificativa

# Justificativa

A realização desse trabalho justifica-se por desenvolver um equipamento que agregue um sistema de coordenadas bidimensional para posicionamento de instrumentos de medição no túnel de vento do Laboratório de Sistemas Térmicos da Universidade Federal do Rio Grande.



## Objetivos

## Objetivo geral

Projetar um dispositivo para o posicionamento de equipamentos de medições dentro de um túnel de vento para facilitar o processo de avaliação de velocidades e pressões de forma automatizada.

Objetivos específicos:

- ▶ Projetar a mesa cartesiana.
- ▶ Criar o sistema eletrônico de comunicação entre a mesa e o software.
- ▶ Desenvolver o software que comandará a mesa cartesiana.

## Introdução

○  
○○○  
○  
○  
○

## Referencial teórico

●  
○  
○  
○  
○○

## Metodologia

○  
○○○○○○○○○○○○  
○○○○○○○○○○○○○○  
○○○○

## Resultados e discussão

○  
○○○○○○○○○○○○○○  
○○○○○○

## Considerações finais

○  
○○  
○○○  
○

# Roteiro

## Introdução

## Referencial teórico

Túnel de vento  
Tubo de Pitot  
Mesa de posicionamento

## Metodologia

## Resultados e discussão

## Considerações finais

## Túnel de vento

## Túnel de vento

O túnel de vento tratado neste trabalho está situado junto ao Laboratório de Sistemas Térmicos da Universidade Federal do Rio Grande e é de característica subsônica, circuito aberto e do tipo soprador.

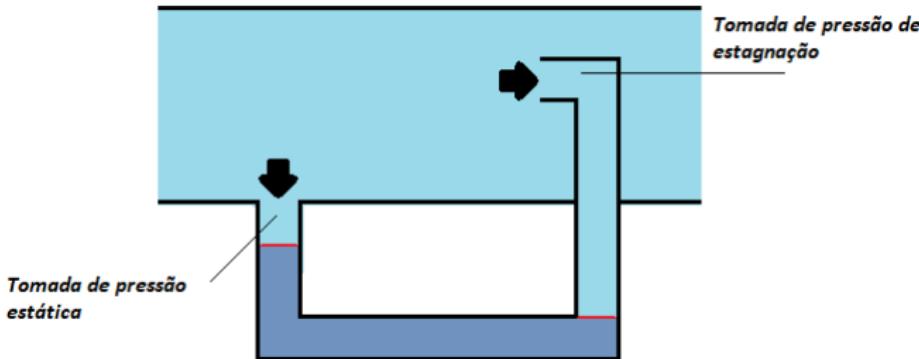


## Tubo de Pitot

## Tubo de pitot

A subtração da pressão total da estática resulta na pressão dinâmica do escoamento

$$\text{Pressão dinâmica} = \text{Pressão total} - \text{Pressão estática}$$



## Mesa de posicionamiento

## Mesa de posicionamiento

Podem ser classificadas em dois tipos com relação a sua transmissão: as mesas acionadas por fusos e por correias sincronizadas.



Introdução  
○  
○○○  
○  
○  
○

Referencial teórico  
○  
○  
○  
●

Metodologia  
○  
○○○○○○○○○○  
○○○○○○○○○○○○  
○

Resultados e discussão  
○  
○○○○○○○○○○○○  
○○○○○

Considerações finais  
○  
○○  
○○○  
○

Mesa de posicionamento

## Mesa de posicionamento

Outro componente importante é o acionador, que pode ser um motor de passo.

Os motores de passo são máquinas utilizadas em aplicações de um alto grau de precisão no movimento em passos fixos, referentes a uma fração de ângulo.



## Introdução

○  
○○○  
○  
○  
○

## Referencial teórico

○  
○  
○○

## Metodologia

●  
○○○○○○○○○○  
○○○○○○○○○○○○  
○○○○

## Resultados e discussão

○  
○○○○○○○○○○○○  
○○○○○

## Considerações finais

○  
○○  
○○○  
○

# Roteiro

## Introdução

## Referencial teórico

### Metodologia

- Sistema mecânico
- Sistema eletrônico
- Sistema de software
- Integração dos sistemas

## Resultados e discussão

## Considerações finais

○○○○

5

10

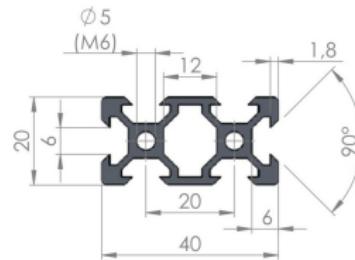
○  
○○  
○○○  
○

## Sistema mecânico

## Estrutura



Figura: Perfil V-slot 20 x 40 mm em alumínio.

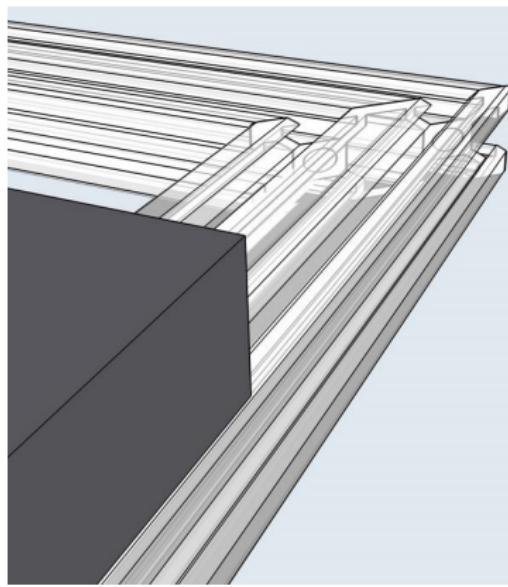


**Figura:** Dimensões do perfil  
20 x 40 mm.



Sistema mecânico

## Estrutura



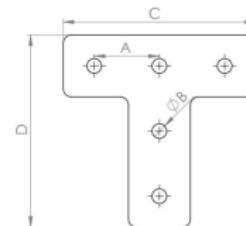


Sistema mecânico

## Estrutura



Figura: Placa T simples de aço.



CÓDIGO	A	B	C	D	MATERIAL	BASE
PA15-01	15	3.2	44	44	Alumínio	15
PLT-20	20	6.6	58	58	Aço	20
PLT-30	30	6.6	88	88	Aço	30
PLT-40	40	9	118	118	Aço	40/45

\*medidas em milímetros

Figura: Dimensões da placa T simples.



Sistema mecânico

## Estrutura



Figura: Perfil V-Slot 20 x 20 mm em alumínio.

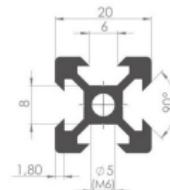


Figura: Dimensões do perfil 20 x 20 mm.



Sistema mecânico

## Estrutura

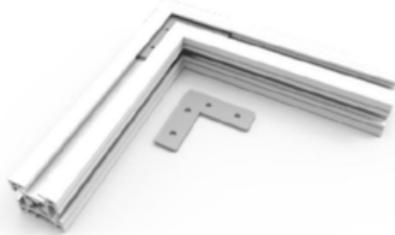
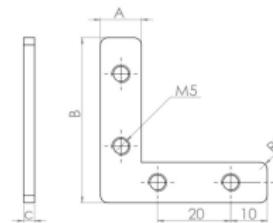


Figura: Placa de conexão interna de 90°.



CÓDIGO	A	B	C	BASE
CNI20-01	9.5	44.7	3	20
CNI20-11	8	40	3	V-SLOT
CNI30-01	15	47.5	3	30
CNI45-01	13.4	37.2	9.5	45 PARAUSO

\*medidas em milímetros

Figura: Dimensões da placa de conexão interna de 90°.



Sistema mecânico

## Estrutura





Sistema mecânico

## Sistema de transmissão

O sistemas de transmissão de potência será dado por meio de fuso trapezoidal. O fuso terá as seguintes características:

- ▶ Rosca TR8x8mm
- ▶ Passo 2mm com 4 entradas
- ▶ Avanço de 8mm por volta, permitindo um deslocamento rápido.





## Sistema mecânico

## Cálculo da máxima deflexão

$$Y_{max} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

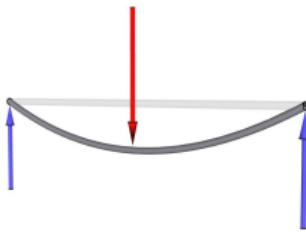


Figura: Diagrama de corpo livre da haste



## Sistema mecânico

# Cálculo da força máxima suportada pelo fuso

$$T = \frac{F \cdot d_m}{2} \cdot \left( \frac{L_a + \pi \cdot f \cdot d_m}{\pi \cdot d_m - f \cdot L_a} \right) + \frac{F \cdot f_c \cdot d_c}{2}$$





## Sistema mecânico

# Cálculo da força máxima suportada pelo fuso

Tensão de flexão da raiz da rosca:

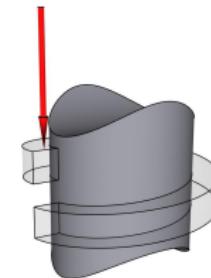
$$\sigma_{raiz} = \frac{6 \cdot (0,38 \cdot F)}{\pi \cdot d_r \cdot n_t \cdot P}$$

Tensão de cisalhamento máximo:

$$\sigma_2, \sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Tensão Máxima:

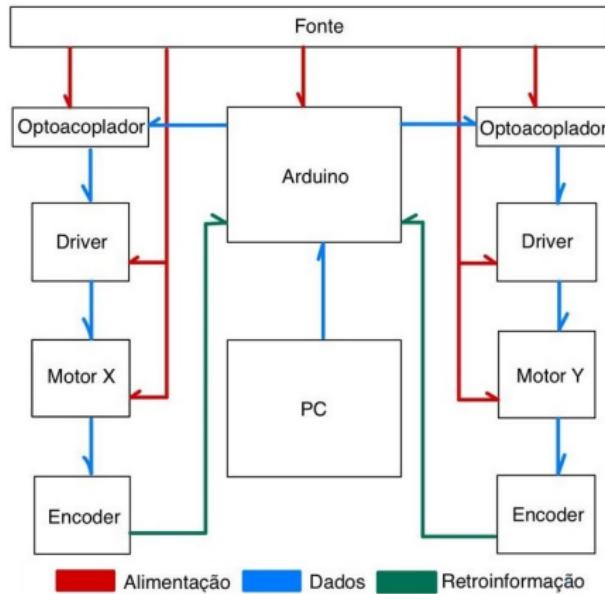
$$\sigma_{1-3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$





Sistema eletrônico

# Diagrama de blocos do sistema eletrônico





Sistema eletrônico

## Placa de prototipagem eletrônica Arduino

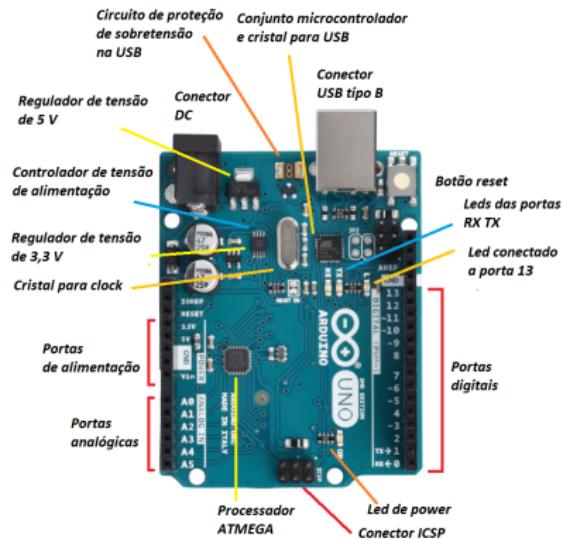
### Funções:

- ▶ Recepção e tratamento dos dados provenientes da interface computacional;
- ▶ O controle dos motores está fundamentado na programação do microcontrolador de acordo com as necessidades definidas inicialmente para operação da mesa cartesiana.



## Sistema eletrônico

# Placa de prototipagem eletrônica Arduino



○○○○

5

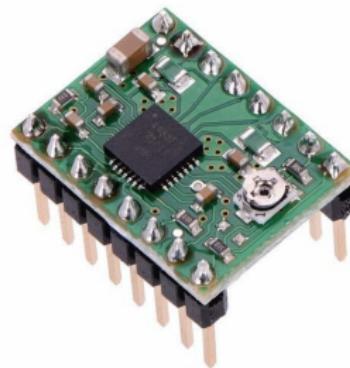
10

○  
○○  
○  
○

## Sistema eletrônico

## Drivers de potência

Os drivers têm a função de, a partir dos sinais originados pelo Arduino, atender a demanda dos motores de passo utilizados.



## Sistema eletrônico

## Atuadores

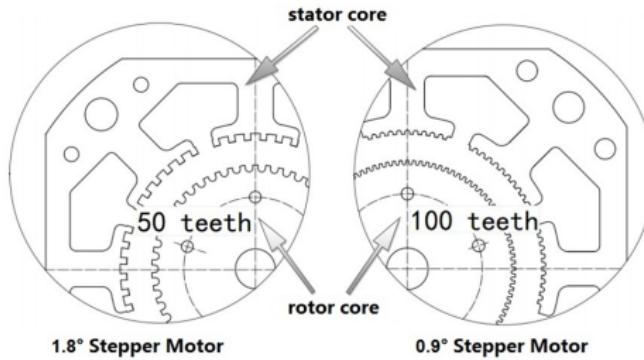
O motor de passo foi escolhido para esse projeto devido a sua capacidade de realizar passos, que são rotações discretas incrementais e precisas.



## Sistema eletrônico

## Atuadores

Os passos são definidos por um número fixo de pólos magnéticos de dente de engrenagens do motor determinando assim, a precisão de ângulo de rotação do motor de passo.



Introdução

## Referencial teórico

## Metodología

## Resultados e discussão

## Considerações finais

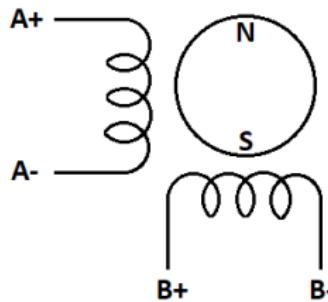
○○○○

○  
○○○○○○○○○○○○○○  
○○○○○○

○  
○○  
○○○  
○

## Sistema eletrônico

## Atuadores



<b>Passo</b>	<b>A+</b>	<b>B+</b>	<b>A-</b>	<b>B-</b>	<b>Decimal</b>
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	2
3	0	1	0	0	4
4	1	0	0	0	8

## Sistema eletrônico

## Fonte de alimentação

Para a escolha correta da fonte de alimentação é necessário definir a demanda de energia elétrica que os dispositivos que são alimentados pela fonte necessitam.

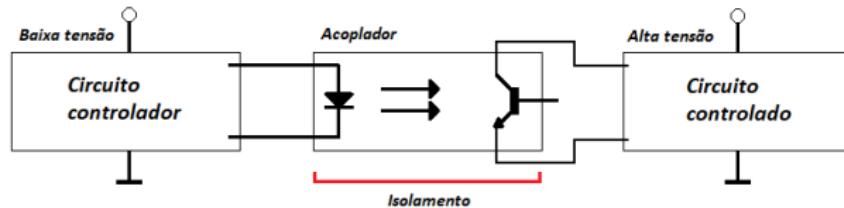
Conforme a determinação da tensão de saída e o cálculo de corrente necessária, é possível determinar que a fonte deve ter 12 V e 10,64 A.



## Sistema eletrônico

## Acopladores ópticos

Os acopladores ópticos são dispositivos que operam por meio de um feixe de luz, para transmitir sinais de um circuito para outro. O led emite um sinal infra vermelho, o foto transistor capta e satura, conduzindo corrente do coletor para o emissor.





Sistema eletrônico

## Encoders

Responsáveis pelo sistema de controle de posição transformando a medida de posição em sinal elétrico digital transmitida à placa controladora.



## Sistema eletrônico

Chaves fim de curso

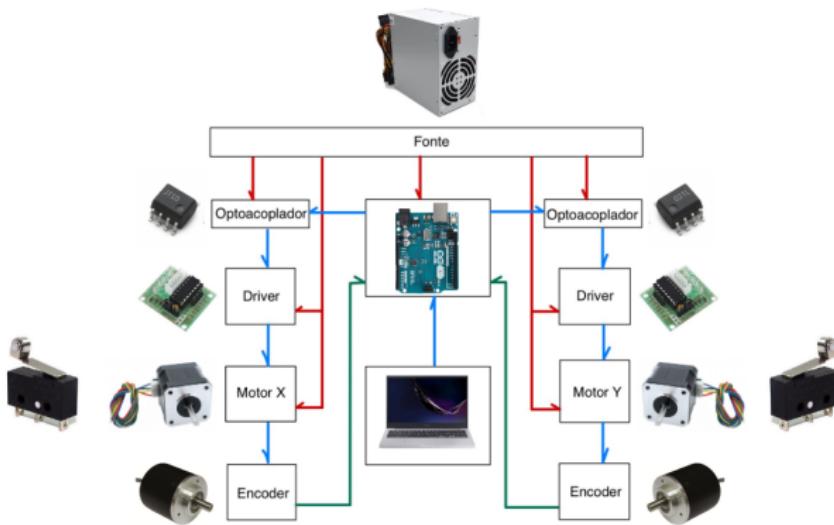
Limitação de campo de movimento de eixos, como os presentes na mesa cartesiana. Tem a capacidade de mudança de estado de conexão em circuitos, alternando o estado de aberto para fechado e vice-versa.





Sistema eletrônico

# Diagrama de blocos do sistema eletrônico

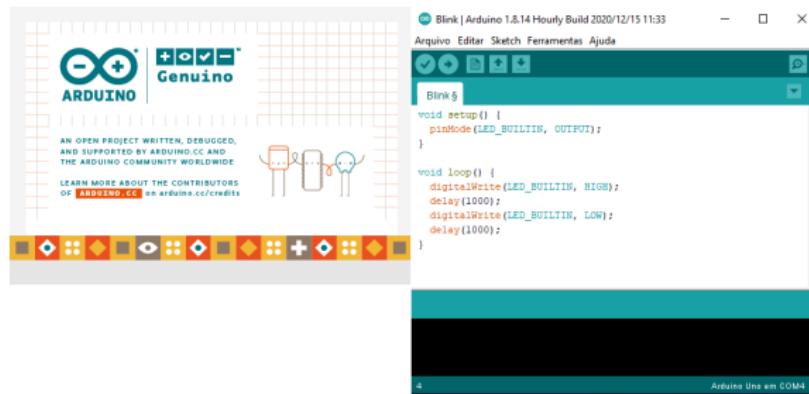




## Sistema de software

# Plataforma de prototipação Arduino IDE

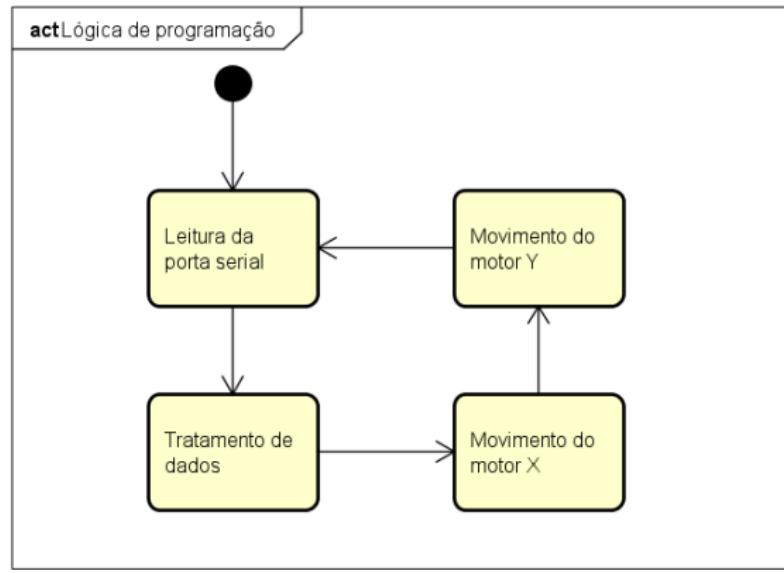
É um software que permite o desenvolvimento e envio de códigos compilados direto para o microcontrolador.





Sistema de software

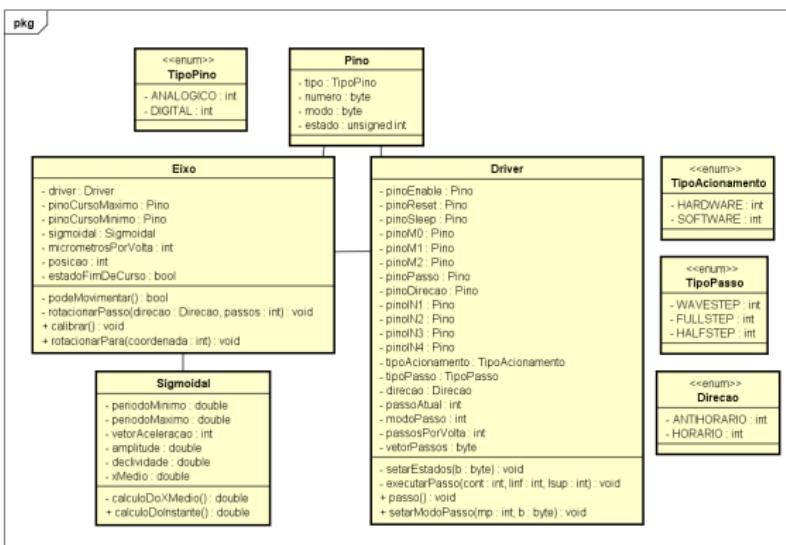
# Lógica de programação





## Sistema de software

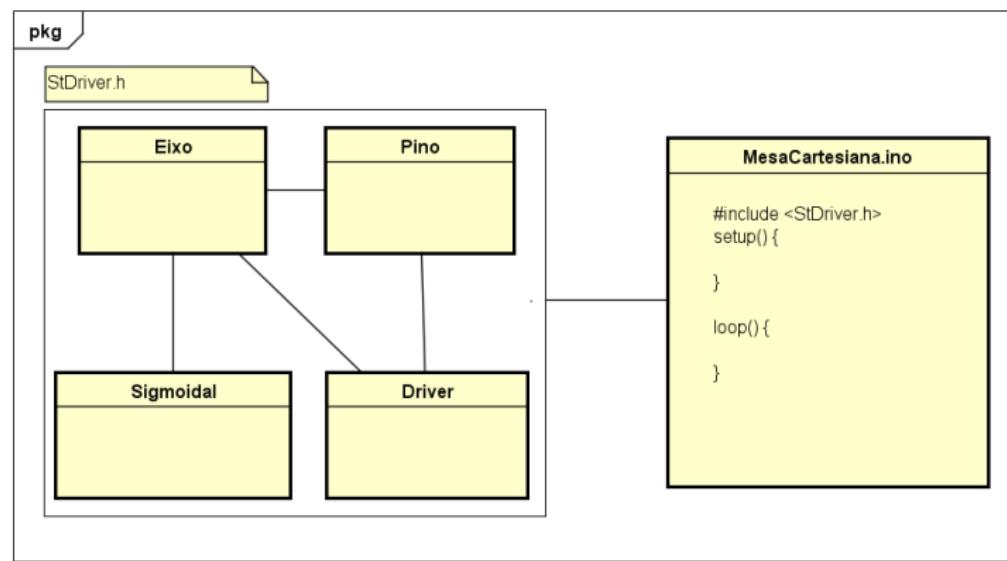
# Diagrama de classes





Sistema de software

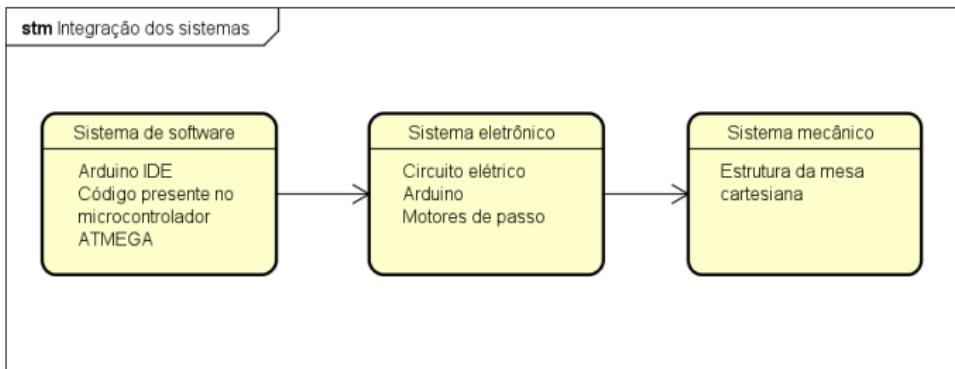
# Organização geral do software





## Integração dos sistemas

# Integração dos sistemas



Roteiro

Introdução

## Referencial teórico

Metodologia

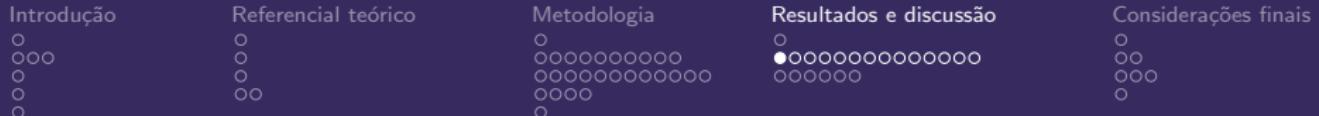
## Resultados e discussão

## Sistema mecânico

## Sistema de software

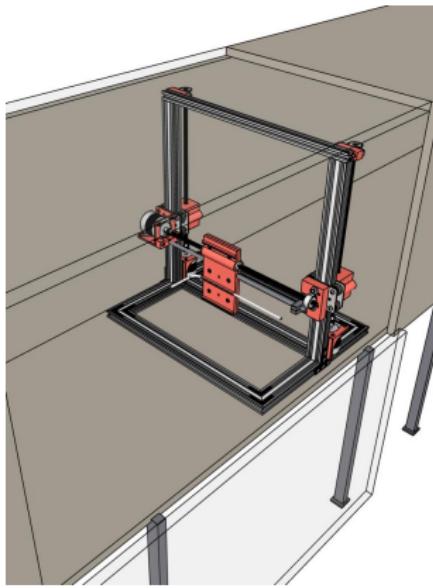
## Considerações finais





## Sistema mecânico

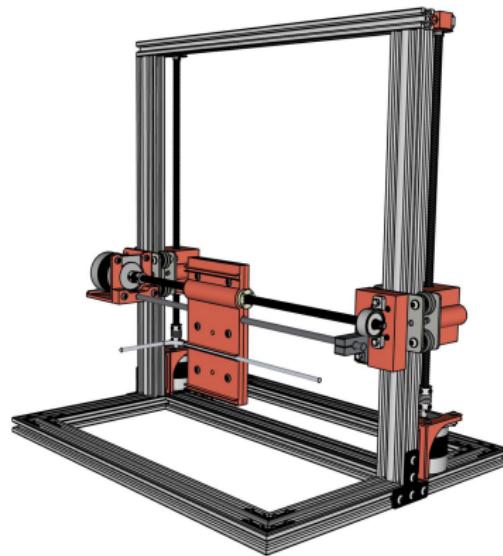
## Mesa cartesiana no túnel de vento

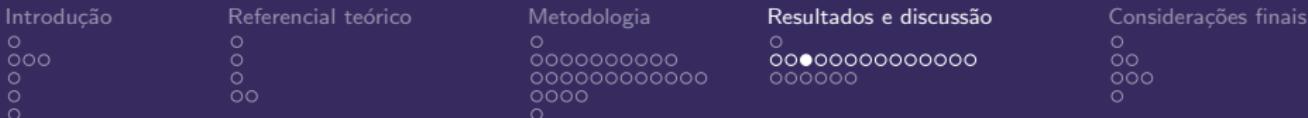




## Sistema mecânico

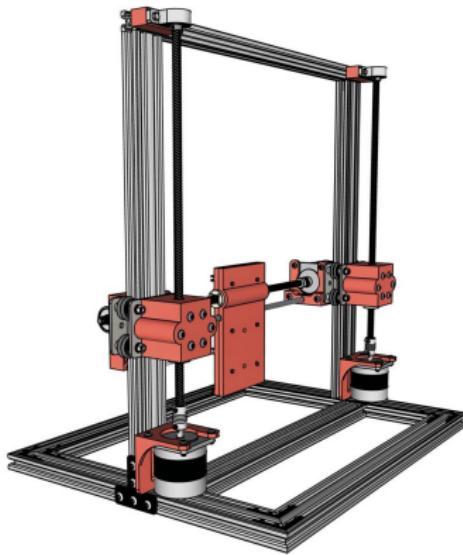
## Mesa cartesiana vista frontal

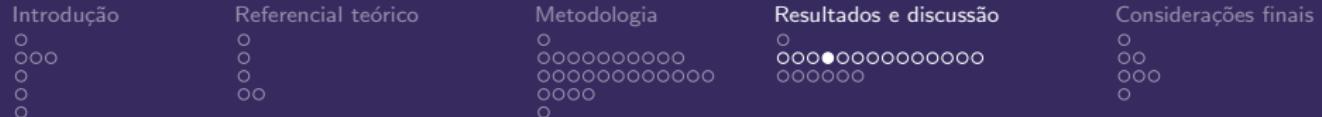




## Sistema mecânico

## Mesa cartesiana vista traseira





## Sistema mecânico

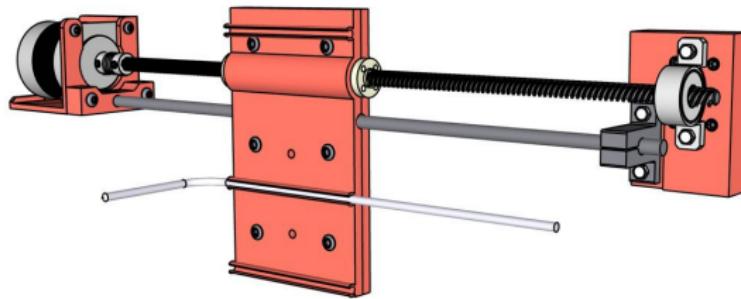
## Sistema de posicionamiento vertical





## Sistema mecânico

## Sistema de posicionamiento horizontal





Sistema mecânico

## Peças em PLA

A seguir serão mostradas as peças fabricadas em PLA.



Sistema mecânico

## Suporte do mancal

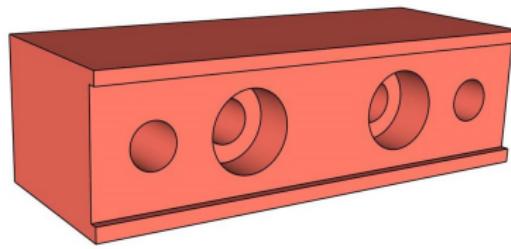


Figura: suportedomancal.stl



Sistema mecânico

## Suporte do motor de passo

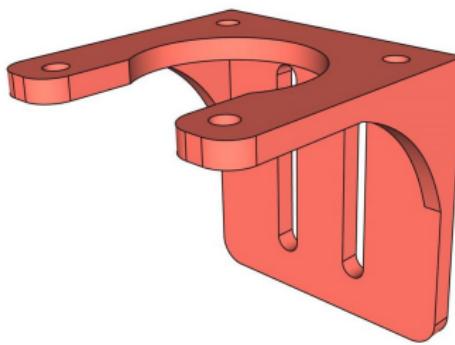


Figura: suportedomotordepasso.stl



Sistema mecânico

## Suporte de elevação

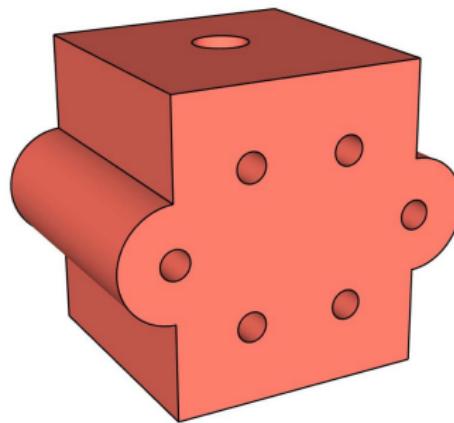
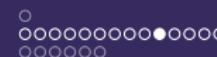


Figura: suportedelevacao.stl



Sistema mecânico

## Suporte do motor horizontal

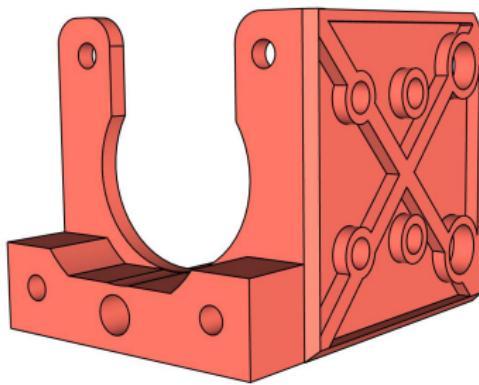


Figura: suportedomotorhorizontal.stl



Sistema mecânico

## Suporte da haste do mancal

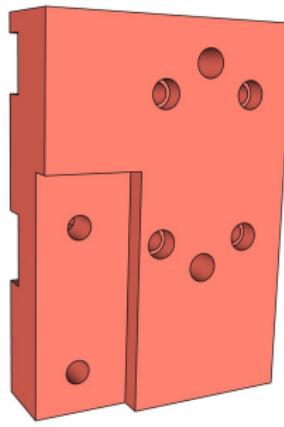
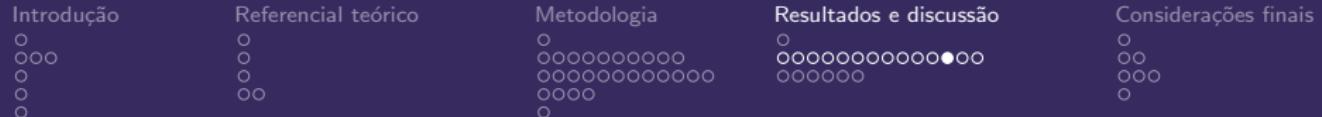


Figura: suportedahastedomancal.stl



## Sistema mecânico

## Suporte de serviço

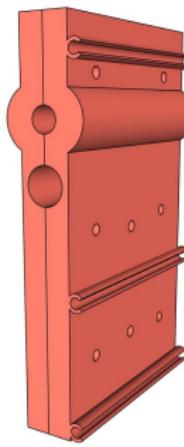


Figura: suportedeservico.stl



Sistema mecânico

## Suporte de serviço

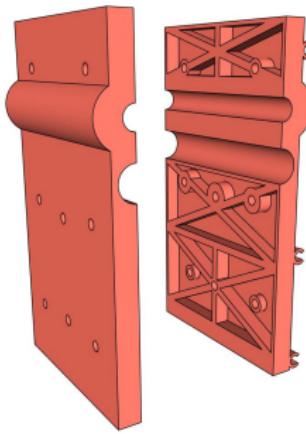


Figura: suportedeservico.stl



Sistema mecânico

## Resultado dos cálculos

- ▶ Para a haste, foi estipulado uma deflexão máxima de  $0,05 \text{ mm}$  resultando em uma força de  $22,92106 \text{ N}$  que equivale aproximadamente  $2,3 \text{ kg}$ . Resultando em um coeficiente de segurança de 2,3.
- ▶ Para a parte do fuso calculou-se a força máxima que ele suportaria erguer, que é de  $306,55 \text{ N}$  ou  $31,2 \text{ kg}$ .
- ▶ Considerando a tensão admissível do aço inox 303 que é de  $241 \text{ MPa}$  com a máxima tensão suportada pelo fuso, na região da raiz do filete, que é de  $18 \text{ MPa}$ , encontrou-se um fator de segurança igual a 13.





Sistema de software

## Classe Pino

```
1 pinoEnableX = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_ENABLE_X,  
2   OUTPUT, LOW);  
3 pinoResetX = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_RESET_X,  
4   OUTPUT, LOW);  
5 pinoSleepX = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_SLEEP_X,  
6   OUTPUT, LOW);  
7 pinoM0X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_M0_X,  
8   OUTPUT, LOW);  
9 pinoM1X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_M1_X,  
10  OUTPUT, LOW);  
11 pinoM2X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_M2_X,  
12  OUTPUT, LOW);
```





Sistema de software

## Classe Sigmoidal

```
1 sigmoidalX = new Sigmoidal(SIG_PERIODO_MAXIMO_X,  
                           SIG_PERIODO_MINIMO_X, SIG_DECLIVIDADE_X);
```



Sistema de software

## Classe Driver - HARDWARE

```
1 pinoPassoX = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_PASSO_X,  
    OUTPUT, LOW);  
2 pinoDirecaoX = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_DIRECAO_X,  
    OUTPUT, LOW);  
3 driverX = new Driver(pinoEnableX, pinoResetX,  
    pinoSleepX, pinoM0X, pinoM1X, pinoM2X, pinoPassoX,  
    pinoDirecaoX);
```



## Sistema de software

## Classe Driver - SOFTWARE

```
1 pinoIN1X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN1_X,
2   OUTPUT, LOW);
3 pinoIN2X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN2_X,
4   OUTPUT, LOW);
5 pinoIN3X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN3_X,
6   OUTPUT, LOW);
7 pinoIN4X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN4_X,
8   OUTPUT, LOW);
9 driverX = new Driver(Driver::WAVESTEP, pinoEnableX,
10   pinoResetX, pinoSleepX, pinoM0X, pinoM1X, pinoM2X,
11   pinoIN1X, pinoIN2X, pinoIN3X, pinoIN4X,
12   vetorPassos);
```



Introdução  
○  
○○○  
○  
○  
○

Referencial teórico  
○  
○  
○  
○○

Metodologia  
○  
○○○○○○○○○○  
○○○○○○○○○○○○  
○○○○

Resultados e discussão  
○  
○○○○○○○○○○○○○○  
○○○●○

Considerações finais  
○  
○○  
○○○  
○

Sistema de software

## Classe Eixo

```
1 driverX = new Driver(pinoEnableX, pinoResetX,  
                      pinoSleepX, pinoM0X, pinoM1X, pinoM2X, pinoPassoX,  
                      pinoDirecaoX);  
2 cursoMaximoX = new Pino(Pino::DIGITAL,  
                           PINO_CURSOMAXIMO_X, INPUT, HIGH);  
3 cursoMinimoX = new Pino(Pino::DIGITAL,  
                           PINO_CURSOMINIMO_X, INPUT, HIGH);  
4 sigmoidalX = new Sigmoidal(SIG_PERIODO_MAXIMO_X,  
                            SIG_PERIODO_MINIMO_X, SIG_DECLIVIDADE_X);  
5 eixoX = new Eixo(driverX, MILIMETROS_POR_VOLTA_X,  
                   ESTADO_FIM_DE_CURSO_X, cursoMaximoX, cursoMinimoX,  
                   sigmoidalX);
```





Sistema de software

## MesaCartesiana.ino

```
1 void inicializarEixos(Driver::TipoAcionamento tp);
2 void interpretarComandos(String comando);
3 void movimentarMesa(String coordenada);
4 void escolherModoPasso(Eixo *e, String modoPasso);
5 void setup();
6 void loop();
7 void serialEvent();
```





# Roteiro

Introdução

Referencial teórico

Metodologia

Resultados e discussão

Considerações finais

Críticas e sugestões para trabalhos futuros

Repositórios

Informações do projeto

Introdução  
○  
○○○  
○  
○  
○

Referencial teórico  
○  
○  
○  
○○

Metodologia  
○  
○○○○○○○○○○  
○○○○○○○○○○○○  
○○○○

Resultados e discussão  
○  
○○○○○○○○○○○○○○  
○○○○○

Considerações finais  
●○  
○○○○  
○

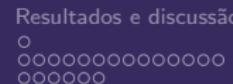
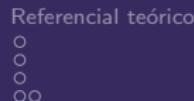
Críticas e sugestões para trabalhos futuros

## Críticas

Algumas críticas podem ser levantadas sobre o protótipo do projeto como:

- ▶ A versão do projeto ainda não possui um sistema completamente automatizado, sendo possível realizar somente a captura dos dados de uma coordenada por vez.
- ▶ Os dados ainda não foram capturados através de algum sensor digital.
- ▶ Os dados não são apresentados de forma gráfica.
- ▶ O sistema eletrônico não tem um case para seu abrigo estando desprotegido, além de ter sido desenvolvido em uma versão de protótipo com a placa Arduino.





Críticas e sugestões para trabalhos futuros

## Sugestões

Algumas melhorias podem ser sugeridas para uma próxima versão do projeto como:

- ▶ Capturar os dados de forma digital através de um sensor.
- ▶ Automatizar a captura de dados para que seja possível o usuário planejar uma rotina e saber o seu tempo estimado.
- ▶ Integrar o sistema de software da mesa cartesiana a um aplicativo que faça geração de relatórios, para uma visualização dos dados de forma gráfica.
- ▶ Desenvolver o circuito eletrônico em uma placa de circuito impresso com os devidos componentes.
- ▶ Projetar um case (caixa) para abrigar os componentes do circuito eletrônico.



Introdução



Referencial teórico



Metodologia



Resultados e discussão



Considerações finais



Repositórios

# Repositório do código do Arduino

The screenshot shows a GitHub repository page for the user 'abaldezjr'. The repository name is 'MesaCartesiana'. The main interface displays a list of commits:

File	Description	Date
.settings	Incluindo inicio do projeto	2 months ago
Release	retirando includes	last month
StDriver	testando master	2 months ago
.project	Atualizando pastas	last month
.gitignore	atualizando nome de alexandre	2 months ago
.project	Incluindo inicio do projeto	2 months ago
MesaCartesiana.ino	Testando commit integrado com o eclipse IDE	last month
README.md	arrumando acentos	2 months ago
git.txt	Colocando o nome	2 months ago
sloeber.ino.cpp	Testando commit integrado com o eclipse IDE	last month
spec.d	Incluindo inicio do projeto	2 months ago

On the right side, there are download options:

- Clone (HTTPS, SSH, GitHub CLI)
- Open with GitHub Desktop
- Download ZIP





## Repositórios

## Repositório do Latex do trabalho de conclusão de curso

Screenshot of a GitHub repository page for 'abaldezjr/tcc'. The repository has 1 branch and 0 tags. The main branch contains 13 commits. A context menu is open over the commit history, showing options like 'Clone', 'Add file', 'Code', 'Open with GitHub Desktop', and 'Download ZIP'. The commit history shows the following details:

Commit	Message	Time Ago
main	Versão com correções enviadas pelo orientador	7 days ago
Apostilas	alterando os arquivos iniciais	7 days ago
elementos-pos-textuais	Versão com correções enviadas pelo orientador	7 days ago
elementos-pre-textuais	Versão com correções enviadas pelo orientador	7 days ago
elementos-textuais	Versão com correções enviadas pelo orientador	7 days ago
figuras	Atualizando desenhos do apêndice	7 days ago
lib	Ultima atualização antes de entregar para o orientador	7 days ago
.gitattributes	Initial commit	28 days ago
.gitignore	Initial commit	28 days ago
LICENSE	Initial commit	28 days ago
README.md	Initial commit	28 days ago
diagramaclasses.asta	Adicionando o projeto asta no projeto, com as figuras exportadas do a...	18 days ago
info.tex	Consertando bugs da folha de rosto e folha de aprovação	11 days ago
main.pdf	Versão com correções enviadas pelo orientador	3 hours ago
main.tex	Ajustes finais antes da entrega	8 days ago





## Repositórios

## Repositório do Latex da apresentação

The screenshot shows a GitHub repository page for the user 'abaldezjr'. The repository name is 'apresentacao'. The main branch is 'main' (1 branch), and there are 0 tags. The repository contains the following files and folders:

- figuras
- lib
- slides
- video
- .gitattributes
- .gitignore
- LICENSE
- README.md
- beamercolorthemelsc.sty
- beamerouterthemelsc.sty
- beamermthemeLsc.sty
- main.pdf
- main.tex

Each item has a description and a timestamp: 'Atualização da titlepage' (except for .gitignore, LICENSE, README.md, and the PDF files). The timestamps range from '6 days ago' to '4 days ago'. On the right side of the repository page, there are options to 'Clone' (via HTTPS or SSH) or 'GitHub CLI', 'Open with GitHub Desktop', and 'Download ZIP'. There is also a 'Code' button.



## Informações do projeto

## Informações sobre o trabalho

#### **Referências:**

- ▶ Apresentação - <https://abaldezjr.github.io/abaldezjr/apresentacao-tcc.pdf>
  - ▶ Latex da apresentação - <https://github.com/abaldezjr/apresentacao-tcc>
  - ▶ Trabalho de conclusão de curso - <https://abaldezjr.github.io/abaldezjr/tcc.pdf>
  - ▶ Latex do trabalho de conclusão de curso - <https://github.com/abaldezjr/tcc>
  - ▶ Projeto do código presente na Placa Arduino - <https://github.com/abaldezjr/MesaCartesiana>

### **Contatos:**

- ▶ Alexandre Baldez Jr. - abaldezjr@gmail.com - <https://github.com/abaldezjr>
  - ▶ Rodrigo Torma - rstorma@hotmail.com