

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, 27 de maio de 2021

Introdução

○
○○○
○
○
○

Referencial teórico

○
○
○
○○

Metodologia

○
○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○
○○○○

Resultados e discussão

○
○○○○○○○○○○○○
○○○○○

Considerações finais

○
○○
○○○
○

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

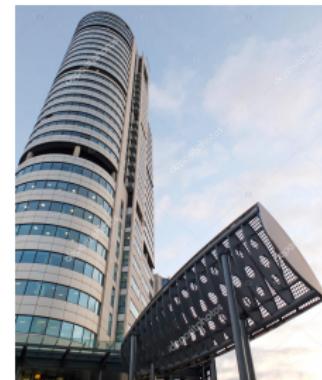


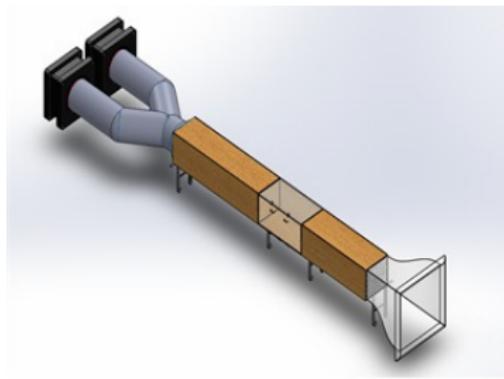
Figura: Bridgewater Place - Leeds
Inglaterra



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.



Introdução

○
○○●
○
○
○

Referencial teórico

○
○
○
○○

Metodologia

○
○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○
○○○○

Resultados e discussão

○
○○○○○○○○○○○○○○
○○○○○

Considerações finais

○
○○
○○○
○

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

Introdução
○
○○○
○
○
○

Referencial teórico
○
●
○
○

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.

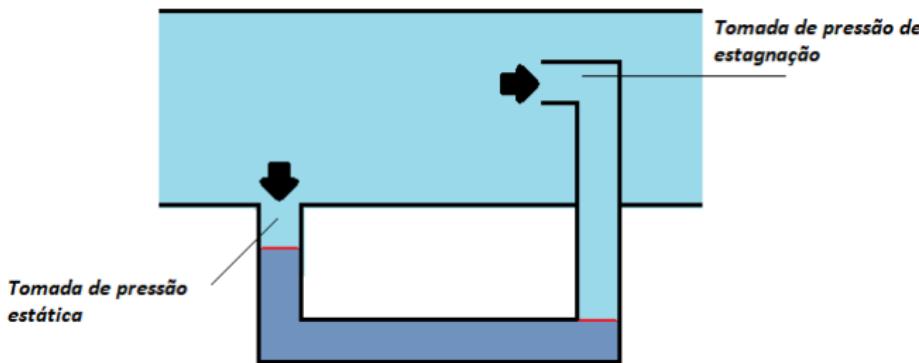


Tubo de Pitot

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

Introdução
○
○○○
○
○
○

Referencial teórico
○
○
○
○

Metodologia
●○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○
○○○○

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

Considerações finais
○
○○
○○○
○

Sistema mecânico

Estrutura



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

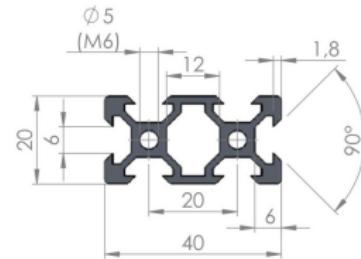
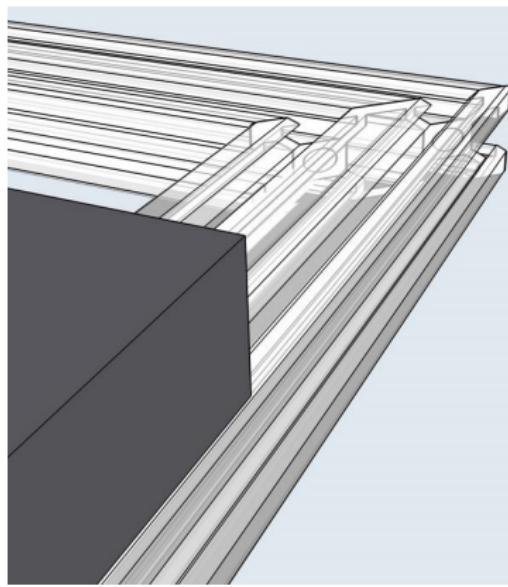


Figura: Dimensões do perfil 20 x 40 mm.



Sistema mecânico

Estrutura



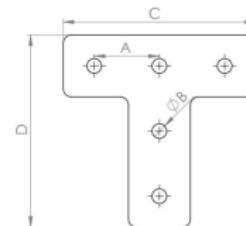


Sistema mecânico

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.

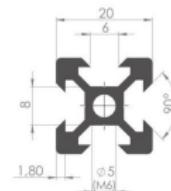


Figura: Dimensões do perfil 20 x 20 mm.



Sistema mecânico

Estrutura

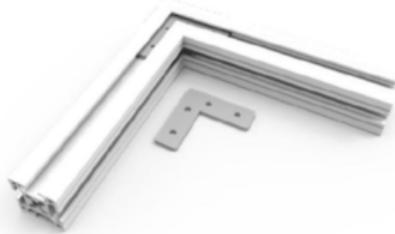
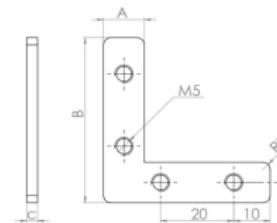


Figura: Placa de conexão interna de 90°.



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

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

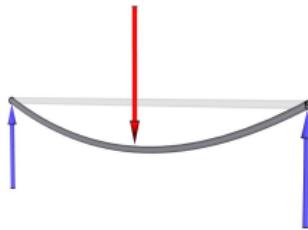


Figura: Diagrama de corpo livre da haste



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:

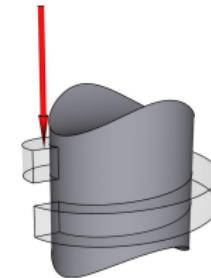
$$\sigma_{raiz} = \frac{6 \cdot (0,38 \cdot F)}{\pi \cdot d_r \cdot n_t \cdot P}$$

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:

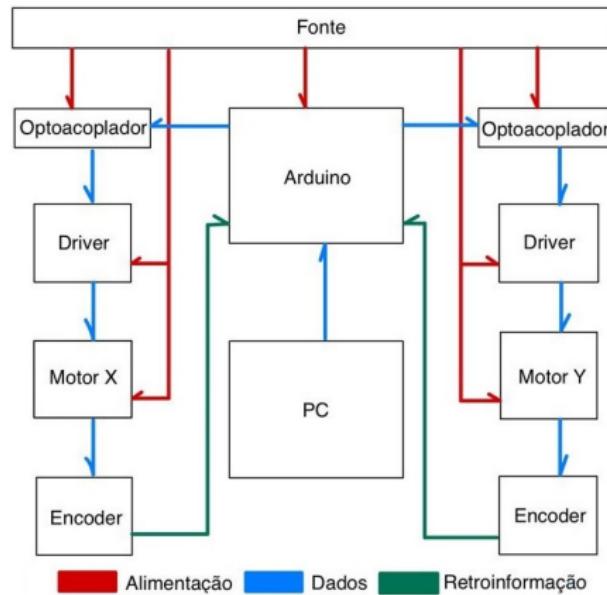
$$\sigma_{1-3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$





Sistema eletrônico

Diagrama de blocos do sistema eletrônico





Sistema eletrônico

Placa de prototipagem eletrônica Arduino

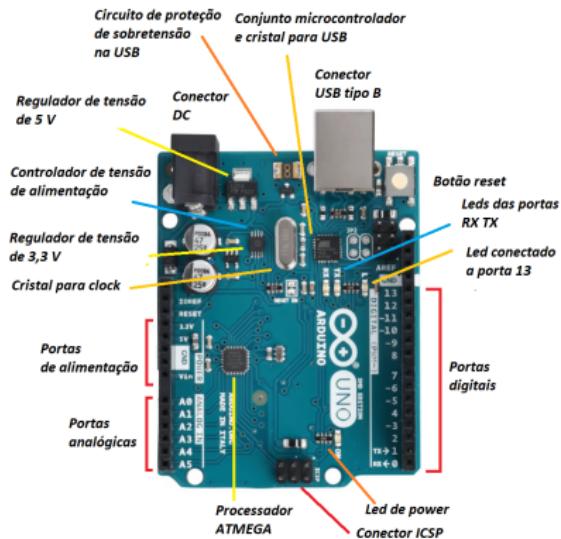
Funções:

- ▶ 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

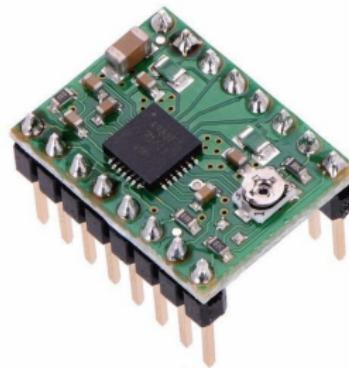




Sistema eletrônico

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

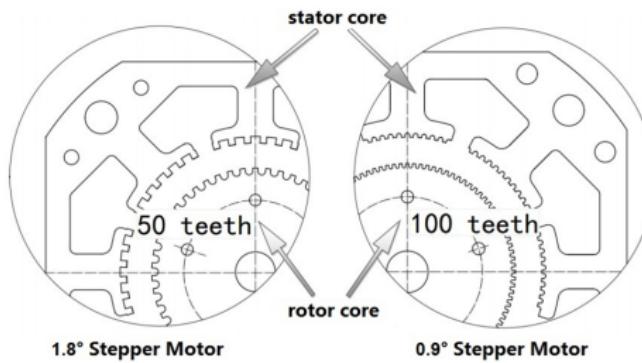
O motor de passo foi escolhido para esse projeto devido a sua capacidade de realizar passos, que são rotações discretas incrementais e precisas.





Atuadores

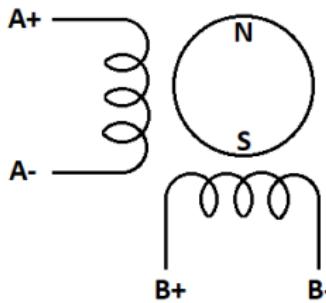
Os passos são definidos por um número fixo de pólos magnéticos de dente de engrenagens do motor determinando assim, a precisão de ângulo de rotação do motor de passo.





Sistema eletrônico

Atuadores



Passo	A+	B+	A-	B-	Decimal
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	2
3	0	1	0	0	4
4	1	0	0	0	8



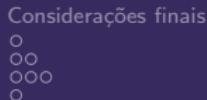
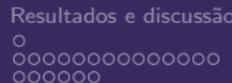
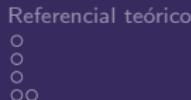
Sistema eletrônico

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.

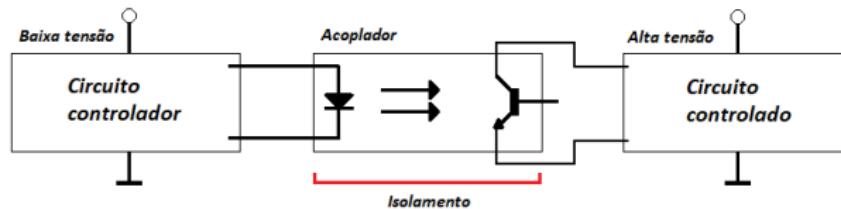




Sistema eletrônico

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

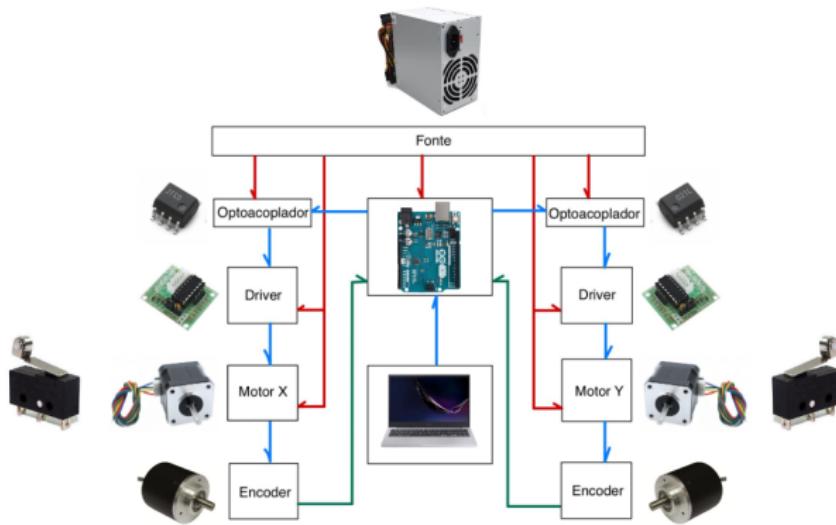
Limitação de campo de movimento de eixos, como os presentes na mesa cartesiana. Tem a capacidade de mudança de estado de conexão em circuitos, alternando o estado de aberto para fechado e vice-versa.





Sistema eletrônico

Diagrama de blocos do sistema eletrônico

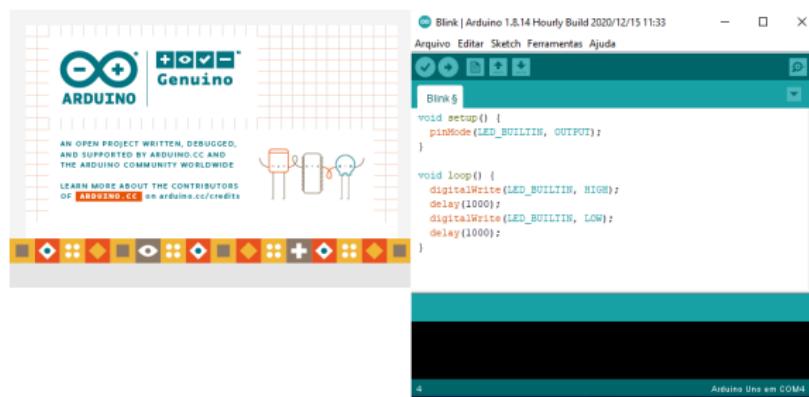




Sistema de software

Plataforma de prototipação Arduino IDE

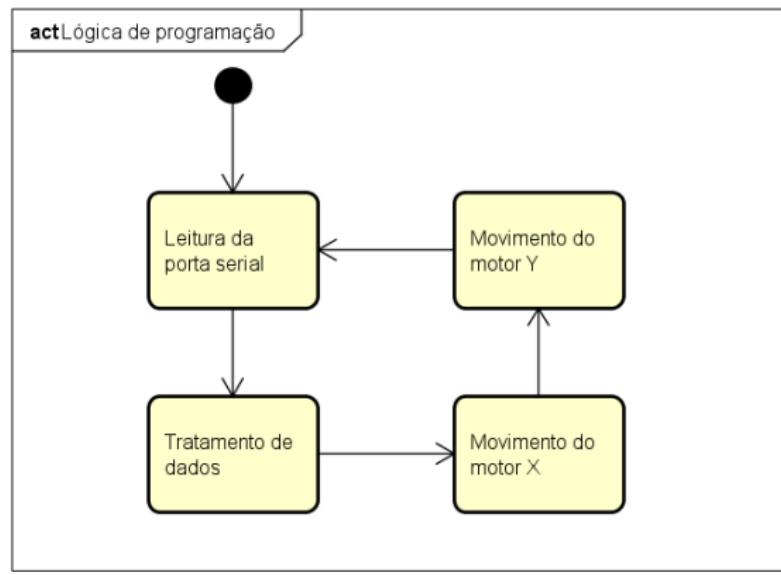
É um software que permite o desenvolvimento e envio de códigos compilados direto para o microcontrolador.





Sistema de software

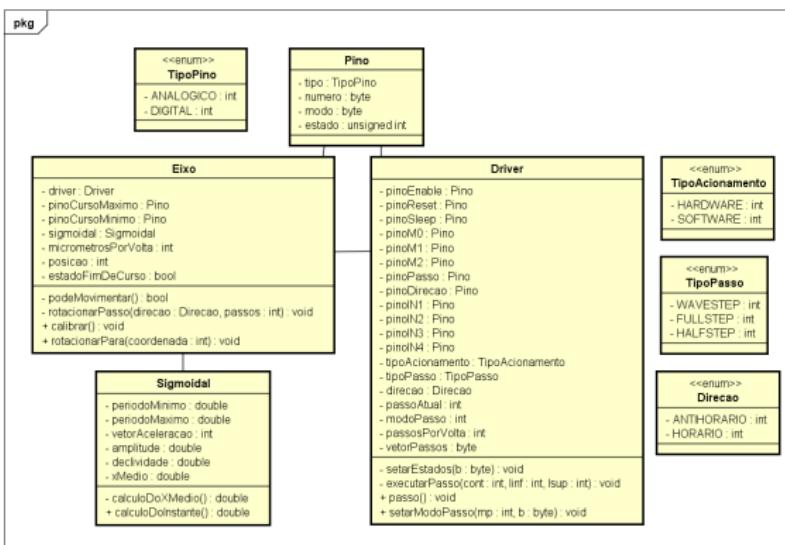
Lógica de programação





Sistema de software

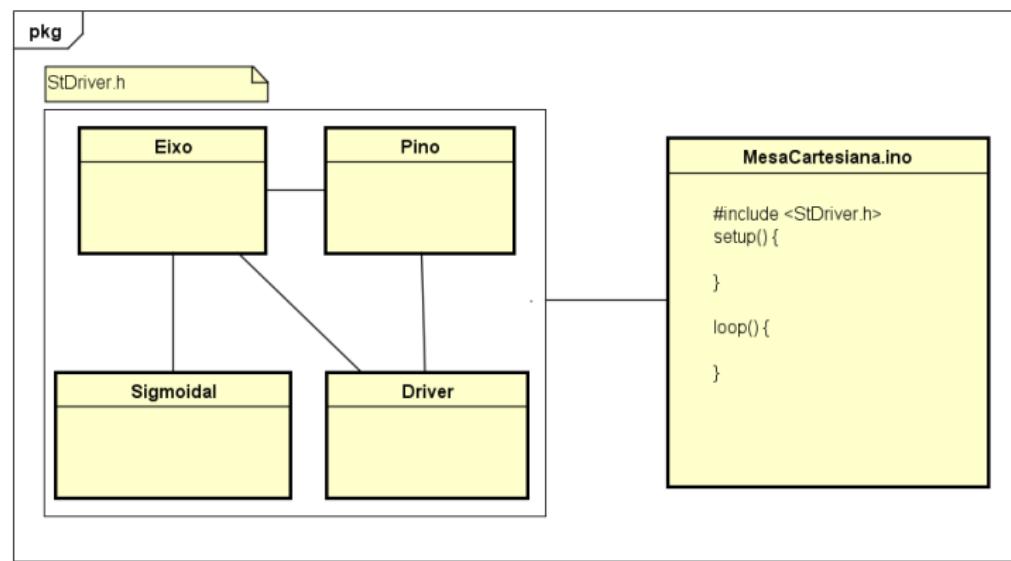
Diagrama de classes





Sistema de software

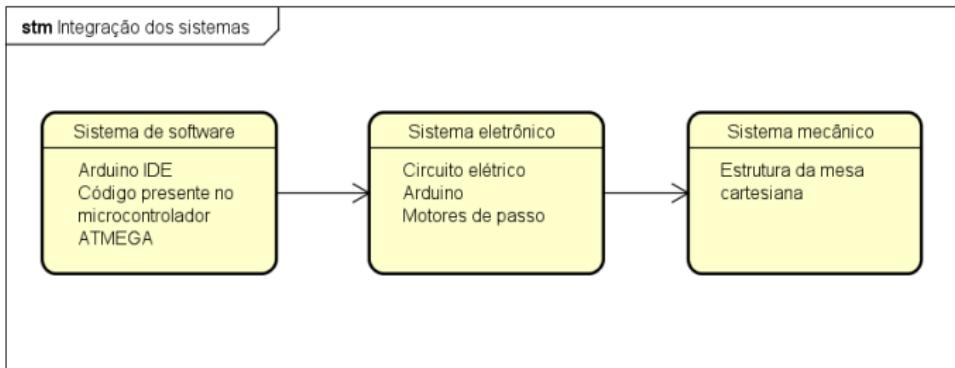
Organização geral do software





Integração dos sistemas

Integração dos sistemas



Introdução

Referencial teórico

Metodologia

Resultados e discussão

Considerações finais



Roteiro

Introdução

Referencial teórico

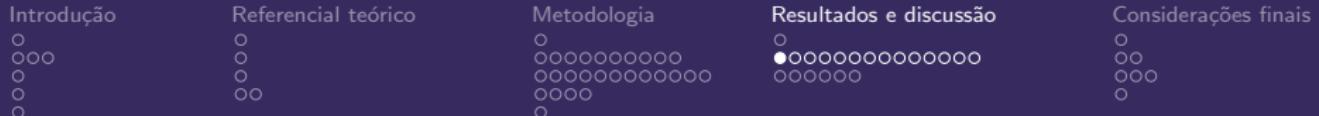
Metodologia

Resultados e discussão

Sistema mecânico

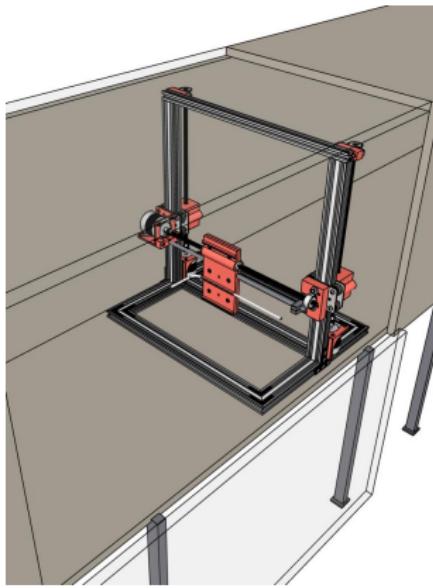
Sistema de software

Considerações finais



Sistema mecânico

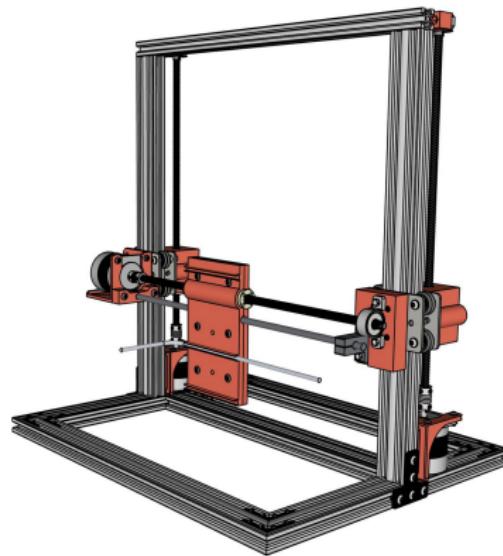
Mesa cartesiana no túnel de vento





Sistema mecânico

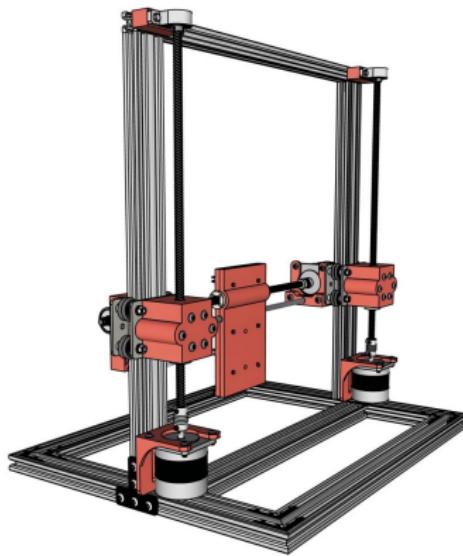
Mesa cartesiana vista frontal





Sistema mecânico

Mesa cartesiana vista traseira





Sistema mecânico

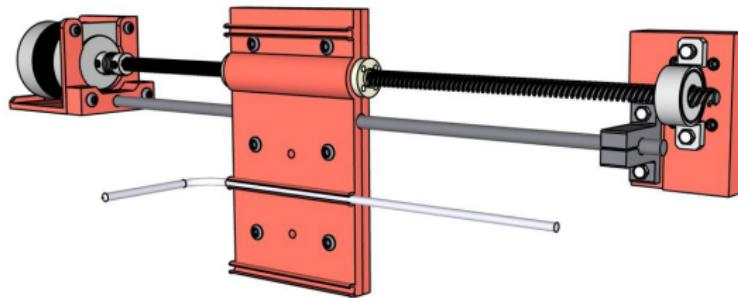
Sistema de posicionamento vertical





Sistema mecânico

Sistema de posicionamento horizontal





Sistema mecânico

Peças em PLA

A seguir serão mostradas as peças fabricadas em PLA.



Sistema mecânico

Suporte do mancal

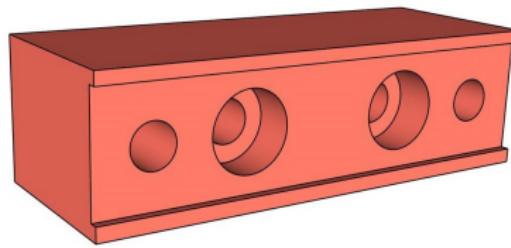


Figura: suportedomancal.stl



Sistema mecânico

Suporte do motor de passo

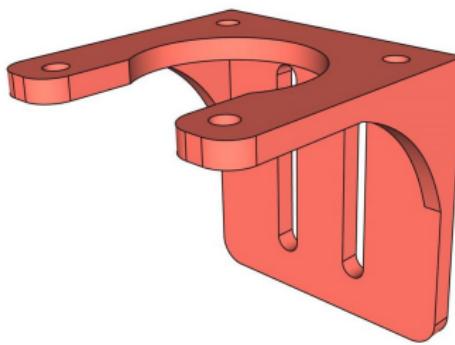


Figura: suportedomotordepasso.stl



Sistema mecânico

Suporte de elevação

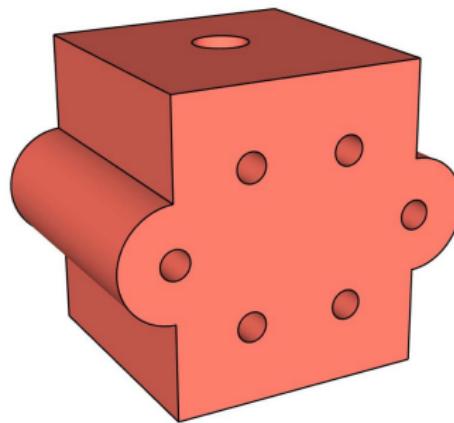


Figura: suportedelevacao.stl



Sistema mecânico

Suporte do motor horizontal

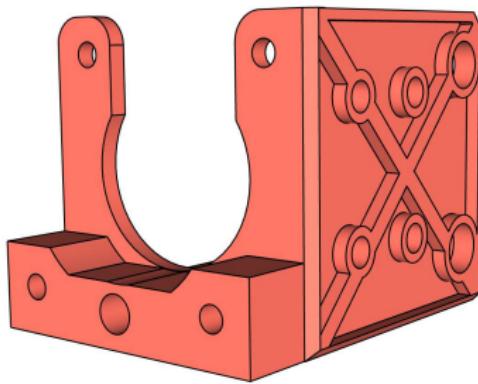


Figura: suportedomotorhorizontal.stl



Sistema mecânico

Suporte da haste do mancal

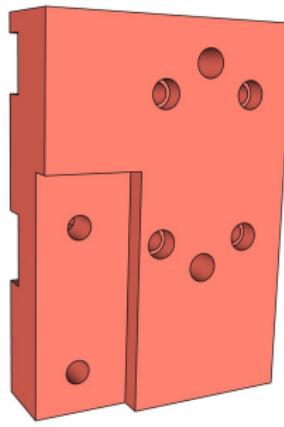
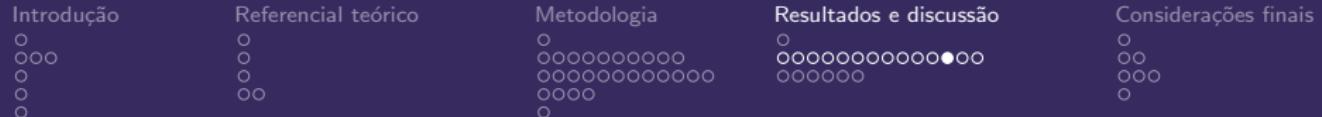


Figura: suportedahastedomancal.stl



Sistema mecânico

Suporte de serviço

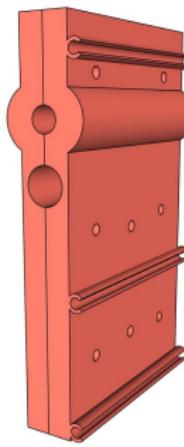


Figura: suportedeservico.stl



Sistema mecânico

Suporte de serviço

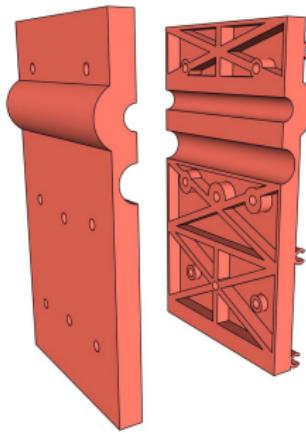


Figura: suportedeservico.stl



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 MPa com a máxima tensão suportada pelo fuso, na região da raiz do filete, que é de 18 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,
    OUTPUT, LOW);
2 pinoIN2X      = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN2_X,
    OUTPUT, LOW);
3 pinoIN3X      = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN3_X,
    OUTPUT, LOW);
4 pinoIN4X      = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN4_X,
    OUTPUT, LOW);
5 driverX       = new Driver(Driver::WAVESTEP, pinoEnableX,
    pinoResetX, pinoSleepX, pinoM0X, pinoM1X, pinoM2X,
    pinoIN1X, pinoIN2X, pinoIN3X, pinoIN4X,
    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
●○
○○○○
○

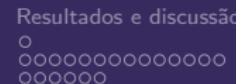
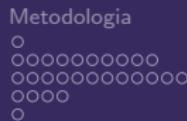
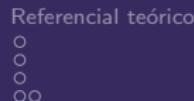
Críticas e sugestões para trabalhos futuros

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 page displays a list of files with their commit history:

File	Description	Last Commit
.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', and 'Download ZIP'. The page also shows 2 branches and 0 tags.





Repositórios

Repositório do Latex do trabalho de conclusão de curso

main · 1 branch · 0 tags

Go to file Add file · Code

abaldezjr Versão com correções enviadas pelo orientador

Apostilas alterando os arquivos iniciais

elementos-pos-textuais Versão com correções enviadas pelo orientador

elementos-pre-textuais Versão com correções enviadas pelo orientador

elementos-textuais Versão com correções enviadas pelo orientador

figuras Atualizando desenhos do apêndice

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 Corrigindo 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

Clone

HTTPS SSH GitHub CLI

<https://github.com/abaldezjr/tcc.git>

Use Git or checkout with SVN using the web URL.

Open with GitHub Desktop

Download ZIP

The screenshot shows a GitHub repository page for 'abaldezjr/tcc'. The main area lists files like 'Apostilas', 'elementos-pos-textuais', and 'figuras' with their respective descriptions and last commit times. A 'Clone' menu is open on the right, displaying options for HTTPS, SSH, and GitHub CLI, along with the repository's URL. Below the clone options are links for 'Open with GitHub Desktop' and 'Download ZIP'.





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 indicating when it was last updated. The repository was created 6 days ago. On the right side of the page, there are options to 'Clone' the repository using HTTPS or GitHub CLI, or to 'Open with GitHub Desktop' or 'Download ZIP'.



Informações do projeto

Informações sobre o trabalho

Referências:

- ▶ Apresentação - <https://github.com/abaldezjr/abaldezjr/blob/main/apresentacao-tcc.pdf>
 - ▶ Latex da apresentação - <https://github.com/abaldezjr/apresentacao-tcc>
 - ▶ Trabalho de conclusão de curso - <https://github.com/abaldezjr/abaldezjr/blob/main/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