

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE

**ALEXANDRE MARQUES BALDEZ JUNIOR,
RODRIGO DE SOUZA TORMA**

**SISTEMA DE COORDENADAS PARA POSICIONAMENTO DE INSTRUMENTOS DE
MEDIÇÃO EM UM TÚNEL DE VENTO**

RIO GRANDE, RIO GRANDE DO SUL

2021

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais Alexandre Marques Baldez e Gladistani Malta Vaz Baldez por compreenderem a minha ausência enquanto eu me dedicava a realização deste trabalho, por me ensinarem o valor da educação e pelo apoio incondicional.

A Fernanda Chaves Lopes que também me ajudou, compreendeu e ensinou nessa caminhada.

Alexandre

Parte do Rodrigo

Rodrigo

Em especial gostaríamos de agradecer aos nossos queridos e incansáveis orientadores Gustavo da Cunha Dias e Letieri Rodrigues de Àvila por acreditarem em nossa capacidade, nos dar o suporte, amizade e terem sido indispensáveis neste ciclo.

Agradecemos a professora Fernanda Mazuco Clain que aceitou ser banca deste trabalho colaborando para sua melhoria e nossa formação.

À Universidade Federal do Rio Grande por todo crescimento pessoal e profissional que vem nos proporcionando

Aos amigos e companheiros de profissão que convivemos ao longo desses anos de curso, que nos incentivaram e tiveram impacto em nossas trajetórias.

RESUMO

O presente trabalho de graduação apresenta o projeto de um sistema de coordenadas cartesianas para posicionamento de instrumentos de medição situado no túnel de vento do laboratório da Universidade Federal do Rio Grande. A concepção do projeto partiu da necessidade de precisão e repetibilidade no deslocamento e posicionamento de instrumentos de medição que caracterizam o campo de velocidade e ou pressão na seção de teste do canal aerodinâmico. Para o desenvolvimento deste sistema, foram utilizadas plataformas de hardware livre, tais como o arduino, visando o baixo custo e fácil reprodução. O sistema consiste em um aplicativo que receberá a coordenada para onde a mesa deve se movimentar. O projeto pode ser dividido em três partes: mecânica, na qual envolve a disposição dos componentes mecânicos; elétrica, na qual se projetou os circuitos elétricos; e a programação, na qual foi desenvolvido o sistema de comando do aplicativo e a mesa. Logo, para a montagem do sistema eletrônico foram utilizados uma placa controladora Arduino Uno, drivers de potência, motores de passo, optoacopladores, encoders. Já para o sistema mecânico foram utilizados eixos, mancais, rolamentos, fusos e estrutura base/pórtico em alumínio.

Keywords: Túnel de vento. Tubo de Pitot. Arduino. Mesa cartesiana

ABSTRACT

The present graduation work presents the project of a system Cartesian coordinates for positioning measuring instruments located in the wind tunnel of the laboratory of the Federal University of Rio Grande. The design of the project started from the need for precision and repeatability in displacement and positioning of measuring instruments that characterize the speed and / or pressure field in the test section of the streamline. For the development of this system, free hardware platforms were used, such as arduino, aiming at low cost and easy reproduction. The system consists of a application that will receive the coordinate to where the table should move. The project can be divided into three parts: mechanical, in which it involves the disposition of mechanical components; electrical, on which the electrical circuits were designed; and the programming, in which the application's command system was developed and the cartesian table. Therefore, for the composition of the electronic system an Arduino Uno controller board, power drivers, stepper motors, optocouplers and encoders were used. For the mechanical system, axes, shafts, bearings, spindles and aluminum structure (base, tower) were used.

Keywords: Wind tunnel. Pitot tube. Arduino. Cartesian table.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Funcionamento das pressões dentro do tubo de Pitot.	13
Figura 2 – Mesa acionada por fuso.	15
Figura 3 – Mesa acionada por correias.	15
Figura 4 – Perfil v_slot 20x40mm em alumínio.	18
Figura 5 – Dimensões do perfil 20x40mm.	19
Figura 6 – Placa de conexão interna de 90°.	20
Figura 7 – Dimensões da placa de conexão interna de 90°.	20
Figura 8 – Estrutura da mesa cartesiana.	21
Figura 9 – Detalhe do encaixe a 45° da base da estrutura.	21
Figura 10 – Perfil v_slot 20x20 mm em alumínio.	22
Figura 11 – Dimensões do perfil 20x20mm.	22
Figura 12 – Placa T simples de aço.	23
Figura 13 – Dimensões da placa T simples.	23
Figura 14 – Fluxograma do sistema eletrônico.	25
Figura 15 – Descrição dos componentes da placa Arduino.	26
Figura 16 – Driver fabricado pela equipe do projeto.	28
Figura 17 – Portas do driver fabricado pela equipe do projeto.	28
Figura 18 – Conceito didático do motor de passo.	29
Figura 19 – Esquema elétrico do motor de passo.	30
Figura 20 – Fonte do sistema.	33
Figura 21 – Funcionamento do acoplador no sistema.	34
Figura 22 – Ambiente de desenvolvimento integrado Arduino.	36
Figura 23 – Fluxo de execução do software.	36
Figura 24 – Diagrama de classes do sistema de software presente no Arduino.	38
Figura 25 – Diagrama da organização geral do software.	43
Figura 26 – Fluxograma para apresentar a integração sistemas.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do driver de potência.	28
Tabela 2 – Sequência de passos com uma fase (wavestep) para movimentação no sentido horário.	31
Tabela 3 – Sequência de passos com duas fases (fullstep) para movimentação no sentido horário.	31
Tabela 4 – Sequência de passos com meio passo (halfstep) para movimentação no sentido horário.	31
Tabela 5 – Sequência de passos com uma fase (wavestep) para movimentação no sentido anti-horário.	31
Tabela 6 – Sequência de passos com duas fases (fullstep) para movimentação no sentido anti-horário.	32
Tabela 7 – Sequência de passos com meio passo (halfstep) para movimentação no sentido anti-horário.	32
Tabela 8 – Parâmetros dos motores de passo.	32
Tabela 9 – Demanda de energia elétrica de cada componente do sistema.	33
Tabela 10 – Declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe Sigmoidal.	39
Tabela 11 – Declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe Pino.	40
Tabela 12 – Declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe Driver.	41
Tabela 13 – Declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe Eixo.	42

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Força gravitacional
ρ_{ar}	Massa específica do ar
ρ	Massa específica do fluido
P_{atm}	Pressão atmosférica
p_1	Pressão estática no ponto 1
p_d	Pressão dinâmica
p_e	Pressão estática
p_t	Pressão total
p_2	Pressão total
V_1	Velocidade do fluido no ponto 1

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO GERAL	10
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	TÚNEL DE VENTO	12
2.2	TUBO DE PITOT	13
2.3	MESA DE POSICIONAMENTO	14
2.4	TRABALHOS RELACIONADOS	16
3	METODOLOGIA	18
3.1	SISTEMA MECÂNICO	18
3.1.1	Estrutura	18
3.1.2	Sistema de transmissão	22
3.1.3	Acionador	24
3.2	SISTEMA ELETRÔNICO	24
3.2.1	Placa de prototipagem eletrônica Arduino	24
3.2.2	Drivers de potência	27
3.2.3	Atuadores	28
3.2.4	Fonte de alimentação	32
3.2.5	Acopladores ópticos	33
3.2.6	Encoders	34
3.2.7	Chaves fim de curso	35
3.3	SISTEMA DE SOFTWARE	35
3.3.1	Plataforma de prototipação Arduino IDE	35
3.3.2	Logica de programação	35
3.3.3	Diagrama de classes	37
3.4	INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	SISTEMA MECÂNICO	45
4.2	SISTEMA ELETRÔNICO	45

4.3	SISTEMA DE SOFTWARE	45
4.4	ANÁLISE DOS TESTES EXPERIMENTAIS	45
4.4.1	Teste ao posicionamento	46
4.4.2	Teste a aceleração	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
5.1	CRÍTICAS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICES	50
	APÊNDICE A – CÓDIGO PRINCIPAL PARA O CONTROLE DA MESA CARTESIANA	51
	APÊNDICE B – CÓDIGO DA CLASSE EIXO PARA O CONTROLE DO EIXO	56
	APÊNDICE C – CÓDIGO DA CLASSE DRIVER PARA O CONTROLE DO DRIVER DE POTÊNCIA.	59
	APÊNDICE D – CÓDIGO DA CLASSE PINO PARA O CONTROLE DOS PINOS	63
	APÊNDICE E – CÓDIGO DA CLASSE SIGMOIDAL PARA O CON- TROLE DA ACELERAÇÃO DOS MOTORES	65
	APÊNDICE F – CÓDIGO DO HEADER STD DRIVER PARA O INCLUDE DE CLASSES	67

1 INTRODUÇÃO

A mecânica dos fluidos é uma área muito complexa da engenharia, mesmo com todo o avanço tecnológico e computacional nem sempre é possível projetar com precisão sem se valer de uma análise prévia da ação de esforços sobre algum material. O estudo da ação do ar sobre estruturas pode ser um fator determinante entre o sucesso e o fracasso de um projeto.

A análise aerodinâmica, se bem conduzida, pode apresentar dados confiáveis ao projetista para o apoio na tomada de decisão. Uma das maneiras de realizar estes estudos é através das leis de similaridade que aplicam os adimensionais de fatores de escala para replicar resultados em escalas reais. Assim, de uma forma menos onerosa é possível se fazer esse estudo em escala reduzida e com condições controladas em laboratório. 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.

Complementar a um controle de escoamento no túnel de vento estão os instrumentos para as grandezas físicas (i. e. pressão e velocidade). O tubo de Pitot e a Sonda de anemômetro de fio quente são exemplos de instrumentos de medição, usados dentro desses canais aerodinâmicos.

A operação desses equipamentos dentro do túnel de vento pode ser de forma manual ou automatizada. A primeira tende a gerar imprecisões, como o posicionamento incorreto do sensor em relação ao seus eixos vertical e horizontal, além de um gasto considerável de tempo e energia, pois o operador, para fazer o reposicionamento do equipamento, deve desligar o túnel, abri-lo e posicionar o equipamento para fazer a próxima medição, gerando assim incertezas de operação. Já a atuação automatizada resolve todos os problemas acima citados, porém o processo de implantação é mais dispendioso.

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.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver 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.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

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

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na primeira seção são apresentados: o tema do projeto, os objetivos, a justificativa e a estrutura do trabalho.

A segunda seção apresenta a revisão bibliográfica a fim de ser referência neste estudo e para fundamentar a base teórica utilizada no trabalho.

A terceira seção apresenta a metodologia e detalhamento dos componentes do projeto em si, que envolve o projeto do sistema mecânico, sistema elétrico, desenvolvimento do software e a integração dos sistemas.

A quarta seção apresenta os resultados referentes a cada sistema, além de uma análise de testes experimentais.

A quinta seção apresenta as considerações finais, críticas e sugestões para trabalhos futuros.

Por último são dispostas as referências bibliográficas e apêndices.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção dispõe de uma breve revisão bibliográfica de assuntos referentes ao tema do projeto, que são os seguintes: túneis de vento, tubos de Pitot e mesas de posicionamento. Por fim, apresenta trabalhos relacionados que envolvem estes assuntos.

2.1 TÚNEL DE VENTO

Os túneis de vento são estruturas que propiciam a simulação para o desenvolvimento de estudos que relacionam o efeito do movimento de ar em torno de objetos, como turbinas, aviões, carros e edificações. Sua estrutura é composta por um duto de diâmetro adequado onde o ar é empurrado ou sucionado por um ventilador. No interior do duto, o ar é analisado através de instrumentos de medição.

O primeiro túnel de vento foi construído na Inglaterra em 1871 por Frank H. Wenham (1824-1908), engenheiro naval britânico e membro da Sociedade Aeronáutica da Grã-Bretanha, esse túnel era de circuito fechado e acionado por uma máquina a vapor. Os estudos de Wenham permitiram avanços no alongamento de uma asa relacionado à força de sustentação (CARMINATTI; KONRATH, 2019).

Em 1897 foi construído por Konstantin Tsiolkovsky o primeiro túnel de vento Russo que era de circuito aberto com um ventilador centrífugo e determinou os coeficientes de arrasto de placas planas, cilindros e esferas (JOGLEKAR; MOURYA, 2014).

Devido às guerras, a produção de túneis de vento teve uma demanda aumentada, pois era necessário a execução de ensaios em aeronaves militares. Já após o período de guerras, os túneis de vento ganharam relevância quando o objetivo foi aumentar a eficiência na aerodinâmica dos carros (SANTOS et al., 2014).

Os túneis de vento podem ser classificados quanto ao circuito que pode ser aberto ou fechado, quanto a velocidade de escoamento em relação à velocidade do som que é chamada de número de Mach (Ma) definindo os escoamentos como sônico, subsônico, supersônico e hipersônico e quanto ao sentido do escoamento que nos túneis de vento de circuito aberto podem ser soprador e sugador, sendo definido pela condição de trabalho do ventilador (PRITCHARD; MITCHELL, 2005).

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.

2.2 TUBO DE PITOT

O tubo de Pitot foi um equipamento criado por Henri Pitot em 1732 para medição da vazão do rio Sena. Pitot de maneira intuitiva apresentou que a altura de uma coluna de líquido conectada ao seu tubo era proporcional à raiz quadrada da velocidade. Ele desenvolveu a técnica mais comum para determinação da velocidade de um fluido, pois a utilização desse tubo é simplificada, além do baixo custo.

O tubo de Pitot apresenta vantagens como sua flexibilidade na utilização de diferentes faixas de velocidade desde o regime subsônico ou supersônico, sendo possível a obtenção de velocidades com alta precisão. No entanto apresenta desvantagens de falta de precisão em baixas velocidades, impossibilidade de medição em escoamentos reversos e dificuldade de obtenção de medições em alta frequência.

Com essa técnica, Pitot obteve a velocidade em um escoamento incompressível em uma área pontual, sendo que é necessário o tubo ser posicionado de modo a ficar alinhado com o escoamento. Com isso se mede a pressão estática e a pressão total ou de estagnação. A subtração da pressão total da estática resulta na pressão dinâmica do escoamento (PRITCHARD; MITCHELL, 2005).

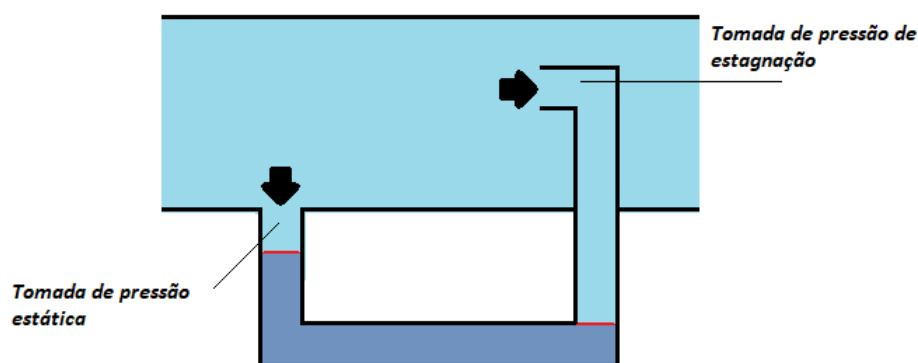


Figura 1 – Funcionamento das pressões dentro do tubo de Pitot.

Fonte: Próprio autor.

Seu princípio de funcionamento está baseado na conhecida equação de Bernoulli onde a pressão dinâmica (p_d) é igual a pressão total (p_t) menos a pressão estática (p_e) (PRITCHARD; MITCHELL, 2005).

$$pd = pt - pe \quad (2.1)$$

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot (V_1)^2 + g \cdot z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot (V_2)^2 + g \cdot z_2 = cte \quad (2.2)$$

$$p_e + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V)^2 + \rho \cdot g \cdot z_e = p_t + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (0)^2 + \rho \cdot g \cdot z_t = cte \quad (2.3)$$

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_t - p_e)}{\rho}} \quad (2.4)$$

$$\rho_{ar} = \frac{P_{atm}}{R_{ar} \cdot T_{ar}} \quad (2.5)$$

Sendo que p_1 é a pressão estática no ponto 1, V_1 é a velocidade do fluido no ponto 1, ρ é a massa específica do fluido, g é a força gravitacional e p_2 é a pressão total.

A equação 2.4 serve para obter a velocidade a partir da pressão e é obtida através da equação de Bernoulli para regime permanente, incompressível e sem atrito conforme a equação 2.2. Percebe-se que a massa específica é função da condição de estado do ar durante os testes sendo determinada a partir da Equação 2.5. Onde R_{ar} é e T_{ar} é...

2.3 MESA DE POSICIONAMENTO

Utilizada para várias finalidades como, posicionamento de peças que serão usinadas em máquinas de Controle Numérico Computadorizada (CNC's), automação de laboratórios, armazenamento de cargas, impressões 3D entre outros tantos propósitos, as mesas cartesianas tem como função principal o posicionamento de alguma ferramenta, para executar algum tipo de serviço.

Também conhecidas como mesa de posicionamento XY, pois como o nome sugere, é uma estrutura com dois eixos de liberdade que permite o posicionamento da peça ou da ferramenta em algum lugar de um plano pré-definido. Podem ser classificadas em dois tipos com relação a

sua transmissão: as mesas acionadas por fusos conforme apresenta a Figura 2 e as acionadas por correias sincronizadas demonstradas na Figura 3.

As mesas de posicionamentos de fuso possuem um alto rendimento, próximo de 95%, um baixo desgaste e uma velocidade máxima de 3 m/s, já as mesas acionadas por correias sincronizadas podem desenvolver velocidades de até 5 m/s, conseguindo altas acelerações devido a sua inércia (ROCHA et al., 2015).

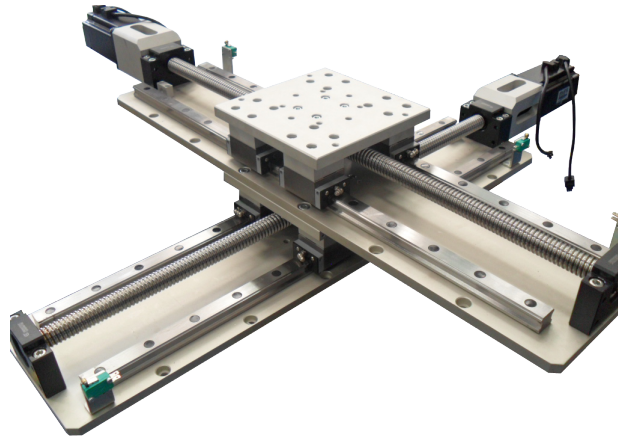


Figura 2 – Mesa acionada por fuso.

Fonte: <https://www.kalatec.com.br/mesa-de-coordenada-xy/>



Figura 3 – Mesa acionada por correias.

Fonte: <https://www.ccmrails.com/2019/01/26/packing-automation/>

Outro componente importante nesse mecanismo é o acionador, que pode ser um motor de passo ou um servomotor. Os motores de passo são máquinas que exercem um papel muito importante atualmente, são utilizados em aplicações onde é requerido um alto grau de precisão no movimento e que este movimento seja feito em passos fixos, referentes a uma fração de

ângulo. Empregados normalmente quando se deseja controlar uma combinação entre a posição do rotor (ângulo), com a devida velocidade e o sincronismo (SILVA, Rafael Schincariol da, 2018).

O funcionamento desse motor se dá através dos princípios do eletromagnetismo, com estatores bobinados e um rotor formado por ímãs permanentes ligados ao eixo. Quando o estator é energizado cria um campo magnético e o rotor move-se para alinhar os ímãs (pólos norte e sul) com as linhas de fluxo magnético, formados pelo estator, movendo o eixo em um ângulo pequeno chamado de passo e continua a girar conforme o incremento angular controlado por circuitos eletrônicos. Esses circuitos digitais tem como função repassar a informação, um pulso, recebido pelo sistema de controle para o motor, que gira com grande precisão conforme seu controle. Como característica marcante, os motores com ímãs permanentes apresentam um torque estático quando não submetidos à tensão devido a força magnética entre os ímãs e o estator, servindo como freio para o sistema.

2.4 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção serão apresentados trabalhos relacionados ao tema deste projeto apresentando os objetivos e resultados de cada um.

O trabalho realizado por BUTIGNOL (2017), tinha o objetivo de desenvolver uma adequação de uma mesa XYZ didática acionada por motores de passo para o estudo de programação em microcontroladores e seu posicionamento em duas dimensões.

Como resultado do trabalho, BUTIGNOL (2017) desenvolveu um aparato eletromecânico de posicionamento de dois eixos e um atuador no terceiro eixo capaz de auxiliar no ensino de microcontroladores. Por fim, o projeto está disponível em <<https://mesaxydidatica.blogspot.com.br>> para sua montagem em outras instituições de ensino.

O trabalho realizado por CAMARGO et al. (1988), tinha o objetivo de desenvolver um sistema posicionador de baixo custo com comando numérico (CNC), utilizando componentes nacionalizados e com uma complexidade mínima no sistema de comando.

Como resultado do trabalho, CAMARGO et al. (1988) fez uma análise comparando diversos parâmetros como: massa, frequência natural amortecida, amplitude média da curva de resposta, perdas de passo, erros de posicionamento, vibração entre outros a fim de demonstrar que a concepção projetada e executada para a mesa de coordenadas XY presente em seu estudo, se justifica com os resultados obtidos.

O trabalho realizado por RAMOS (2018), tinha o objetivo de projetar e construir uma mesa cartesiana para ser colocada nos túneis aerodinâmicos existentes no Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, para assim, dar a capacidade de deslocamento de sensores como: tubo de Pitot, anemômetro de fio quente, anemômetro laser-Doppler para qualquer ponto na seção escolhida.

Como resultado do trabalho, RAMOS (2018) construiu uma mesa cartesiana funcional com capacidade de efetuar medições de velocidade em uma malha de cem posições, podendo inserir coordenadas através da porta serial do Arduino. Ainda comprovou por testes experimentais a precisão dos motores de passo ao comprovar que não existe diferença mensurável entre o valores medidos com os ideais.

O trabalho realizado por HOSS (2018), tinha o objetivo a instrumentação e desenvolvimento do sistema de controle de velocidade do vento de um túnel de vento com propulsão por motor a combustão interna, existente no laboratório de Conformação do IFSC Campus Chapecó.

Como resultado do trabalho, Hoss (2018) alcançou o objetivo permitindo medir variáveis de forma confiável com incertezas pequenas dentro dos requisitos estabelecidos, mesmo com emprego de sensores de baixo custo e média precisão.

3 METODOLOGIA

A metodologia desse projeto será dividida em quatro fases: sistema mecânico, sistema eletrônico, desenvolvimento do sistema de software e integração dos sistemas.

3.1 SISTEMA MECÂNICO

Nessa sessão será desenvolvido o projeto de sistema mecânico que se divide em estrutura e componentes. Para compreensão facilitada do projeto, os cálculos de resistência e equilíbrio foram desconsiderados, já que o equipamento é de pequena escala.

3.1.1 Estrutura

A estrutura ou mesa cartesiana, como é chamada neste trabalho, compõem o sistema mecânico junto com seus componentes, é a parte responsável por manter a união das peças que ela a compõem e também servir de base para o posicionamento dentro da área de testes do túnel de vento. Como o túnel de vento do Laboratório de Sistemas Térmicos da Universidade Federal do Rio Grande é utilizado para atividades de pesquisa em energia renovável e fenômenos de transporte, optou-se por projetar uma estrutura móvel, que pode ser colocada e retirada de dentro do túnel, quando há a necessidade da caracterização do canal aberto. Para que essa operação se torne prática a mesa deve ser leve e resistente.



Figura 4 – Perfil v_slot 20x40mm em alumínio.

Fonte: www.forsetisolucoes.com.br

Por ser um metal leve, durável e resistente, o alumínio se torna uma boa opção para a confecção desta estrutura. Com uma alta relação resistência / peso, confere um excepcional desempenho, além de dar um ótimo acabamento à peça. A estrutura de metal será dividida em duas partes, a base e o pórtico. A base será o componente que terá a função de dar estabilidade a mesa e evitar que esta venha a tombar, terá um formato retangular de 500x400 mm e será feito com um perfil v_slot de 20 x 40 mm em alumínio, conforme apresentado na Figura 4. Para fazer a união dos perfis, que serão cortados em tamanho adequado com cantos esquadrejados em ângulo de 45 graus, para dar um melhor acabamento à peça, será utilizada uma placa de conexão interna de 90 graus, conforme Figura 6, que unirá os cantos dos perfis por meio de parafusos Allen sem cabeça M5.

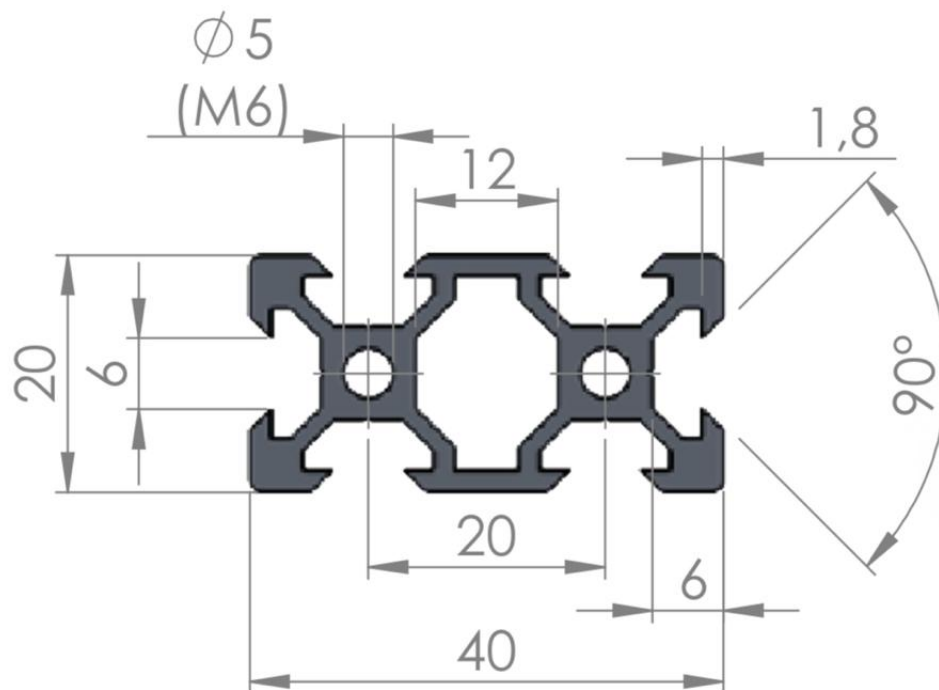


Figura 5 – Dimensões do perfil 20x40mm.
Fonte: www.forsetisolucoes.com.br

O pórtico será feito com o perfil v_slot de 20x20 mm em alumínio conforme apresenta a Figura 10, e terá as dimensões de 500x480 mm. Sua função é sustentar e estabilizar o sistema de transmissão. Para fixação do pórtico à base será utilizada uma placa T simples de aço. Na montagem da parte superior do pórtico a união se dará por meio de parafusos M6 diretamente nos perfis.

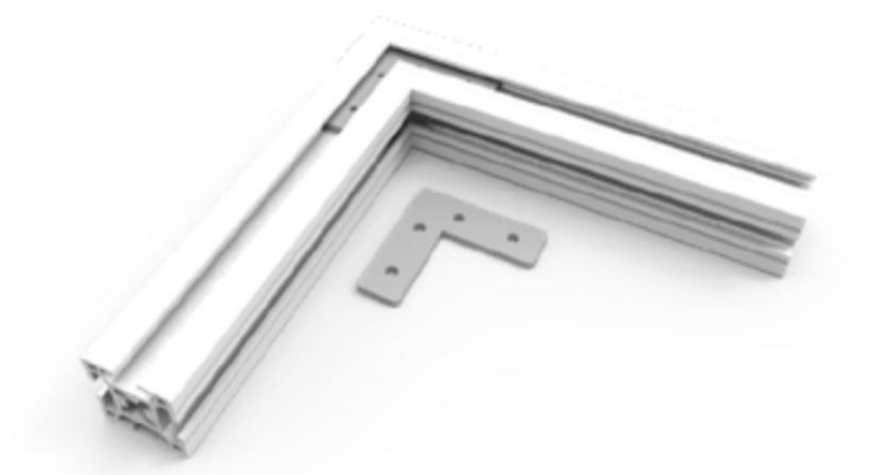
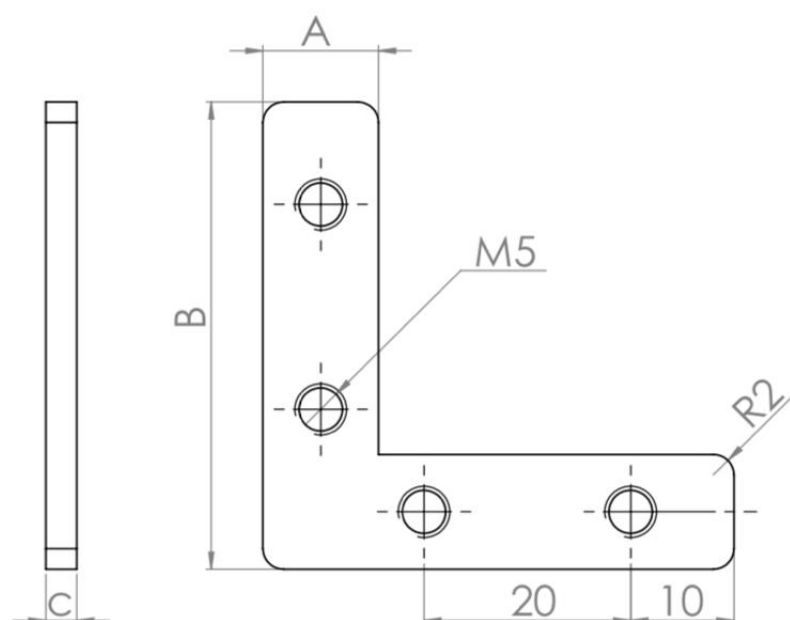


Figura 6 – Placa de conexão interna de 90°.

Fonte: www.forsetisolucoes.com.br



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 7 – Dimensões da placa de conexão interna de 90°.

Fonte: www.forsetisolucoes.com.br

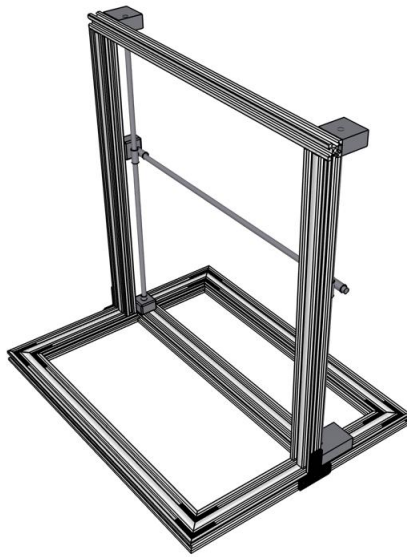


Figura 8 – Estrutura da mesa cartesiana.
Fonte: Próprio autor

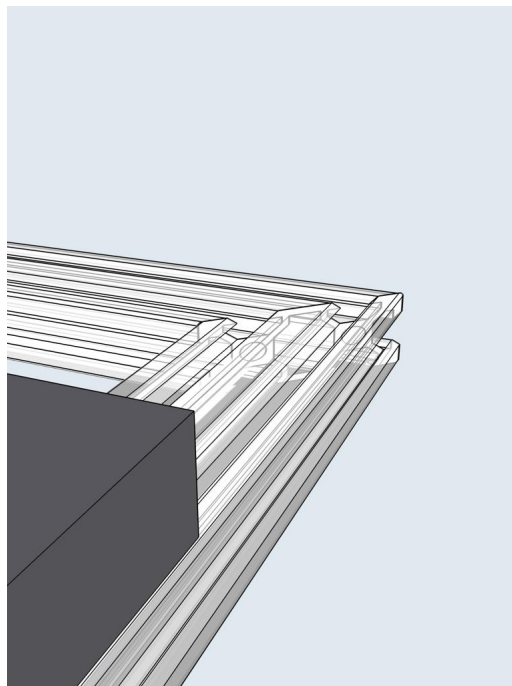


Figura 9 – Detalhe do encaixe a 45° da base da estrutura.
Fonte: Próprio autor



Figura 10 – Perfil v_slot 20x20 mm em alumínio.
Fonte: www.forsetisolucoes.com.br

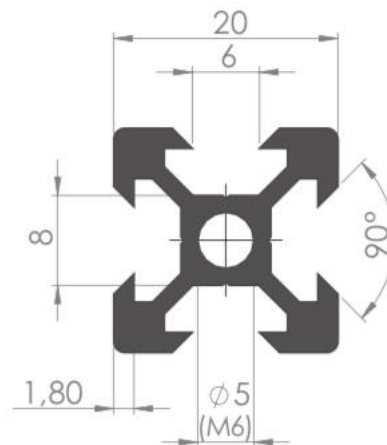


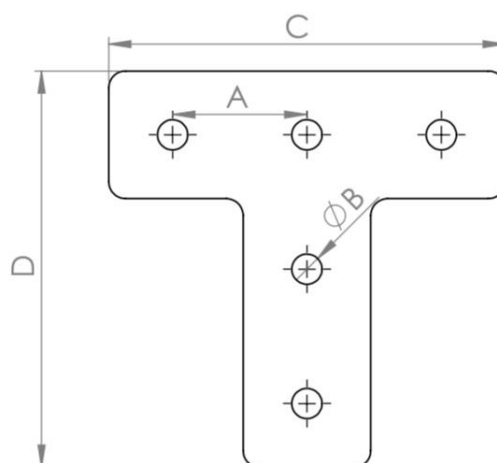
Figura 11 – Dimensões do perfil 20x20mm.
Fonte: www.forsetisolucoes.com.br

3.1.2 Sistema de transmissão

Segundo BUDYNAS; NISBETH (2016), o parafuso de potência é um dispositivo usado para transformar o movimento angular em movimento linear e, usualmente, para transmitir potência. Para fazer o movimento dos carros do eixo X e do eixo Y, componentes que farão o efetivo deslocamento do equipamento de medição dentro da área de teste do túnel de vento, o fuso foi escolhido como elemento de transmissão, que vai transformar o movimento giratório do motor de passo em deslocamento linear na estrutura da mesa cartesiana. Acoplados aos motores de passo, por meio de acopladores de eixo e na outra extremidade por mancal para fuso de 8 mm,



Figura 12 – Placa T simples de aço.
Fonte: www.forsetisolucoes.com.br



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 13 – Dimensões da placa T simples.
Fonte: www.forsetisolucoes.com.br

os fusos farão o transporte dos carros horizontal e vertical.

Para que se tenha um deslocamento mais rápido das castanhas, elemento que estarão em

contato direto com o fuso e o carro, foi selecionado o fuso trapezoidal de 8 mm de diâmetro e 8 mm de passo. Será utilizado uma guia para o deslocamento horizontal, para o deslocamento vertical será utilizado um fuso acoplado ao motor é uma guia no lado oposto, apenas para dar suporte ao elemento que fixará o fuso horizontal

3.1.3 Acionador

Os motores elétricos são máquinas capazes de transformar energia elétrica em energia mecânica, essa energia se dá em forma de movimento angular. São equipamentos versáteis, muito eficientes e amplamente utilizados. Para fazer a movimentação dos carros, nos eixos X e Y, optou-se por motores de passo, por que é um motor que possibilita o controle da velocidade e o posicionamento preciso, pois rotaciona em ângulos bem definidos, chamados de passos. O ponto negativo desses motores é que o controle é mais complexo, necessitando de um comando eletrônico digital para fazê-lo funcionar, por outro lado apresenta uma grande precisão no seu movimento. Os motores serão acoplados aos perfis da estrutura de modo a possibilitar o movimento dos fusos e consequentemente o equipamento de medição, que estará preso a ele por meio de uma guia com roldana.

3.2 SISTEMA ELETRÔNICO

O sistema eletrônico de uma mesa cartesiana foi dividido em módulos para um melhor detalhamento: placa de prototipagem eletrônica Arduino, drivers de potência, atuadores elétricos, fonte de alimentação, optoacopladores, encoders e um computador. É importante lembrar que para menor custo do projeto optou-se pela criação de dispositivos.

3.2.1 Placa de prototipagem eletrônica Arduino

A placa de prototipagem eletrônica Arduino é responsável pela 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.

Com o objetivo de elaborar uma interface de prototipagem de baixo custo para uso em projetos escolares, o arduino foi criado por um grupo de pesquisadores na Itália em 2005. Na sua concepção, para ter maior flexibilidade a diversos tipos de projetos, isto é, para que qualquer

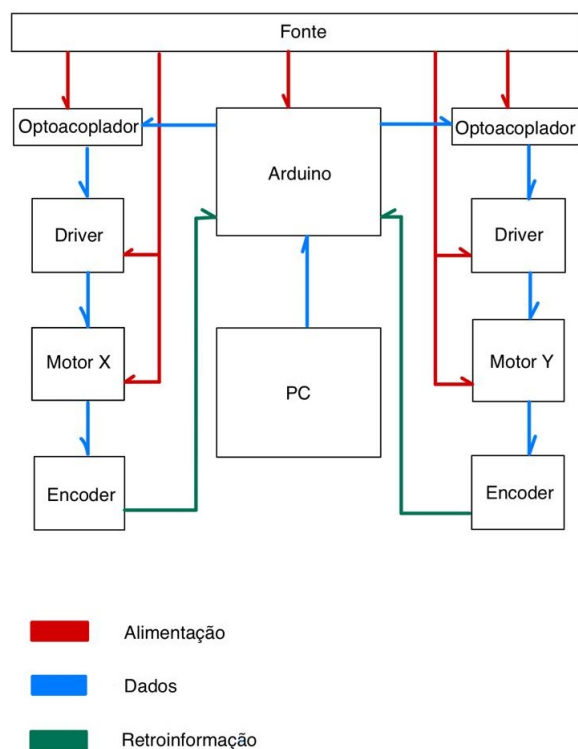


Figura 14 – Fluxograma do sistema eletrônico.
Fonte: Próprio autor.

projetista pudesse personalizá-lo, foi adotado o conceito de hardware livre.

Em sua composição, a placa Arduino UNO contém um microcontrolador ATMEL AT-MEGA328, que é um dispositivo de 8 bits da família AVR com arquitetura RISC avançada e com encapsulamento DIP28, além de quatorze portas digitais de entrada e saída, sendo que seis delas com capacidade de PWM (Pulse Width Modulation), seis entradas analógicas e 32 KB de memória flash, 2 KB de RAM e 1 KB de EEPROM.

A alimentação é via porta USB ou por conector tipo Jack de alimentação externa que trabalha entre os limites de 6 V e 20 V sendo recomendável o uso de 7 V a 12 V para não danificar. Para o fornecimento de tensão contínua para alimentação dos circuitos e Shields, a placa Arduino UNO tem um regulador de tensão de 3,3 V.

Além de alimentar, a porta USB é a via de comunicação com o computador para o envio do código de máquina gerado pelo compilador. O código compilado é enviado pelo microcontrolador ATMEL ATMEGA16U2 que está conectado a dois LEDs chamados de TX e RX cuja função é a indicação do envio e recepção dos dados da placa para o computador.

A placa Arduino é programada via IDE (Integrated Development Environment, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado), utilizando uma linguagem baseada em C/C++.

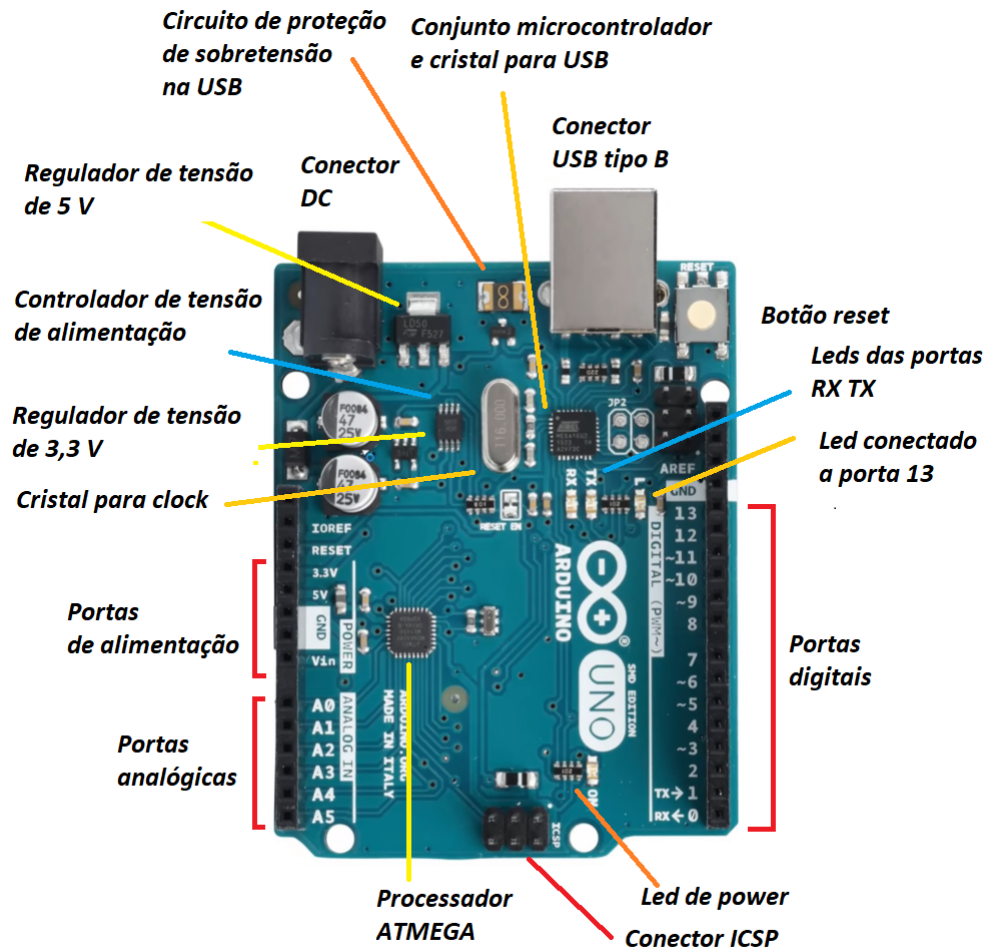


Figura 15 – Descrição dos componentes da placa Arduino.

Fonte: Próprio autor.

- **Botão reset:** o botão reset serve para reiniciar a placa arduino.
- **Conector USB tipo B:** o conector USB tipo B serve para conectar a placa Arduino ao computador.
- **Conector DC:** o conector DC serve para alimentação externa do Arduino.
- **Portas digitais:** são às portas que trabalham com os sinais digitais que são sinais com valores discretos, no arduino temos às constantes LOW que significa 0 V e também HIGH que significa 5 V, no código são 0 e 1 respectivamente. Dentro das portas digitais temos às portas PWM (Pulse Width Modulation) que são portas que modulam o sinal pela largura do pulso, no arduino podemos variar de 0 a 255. Resumidamente, a placa Arduino possui quatorze portas digitais, sendo que seis delas são portas PWM como dito anteriormente, os pinos delas são 3,5,6,9,10 e 11.
- **Portas analógicas:** são às portas que trabalham com os sinais analógicos que são sinais com valores contínuos, no arduino podemos variar de 0 a 1023.

- **Portas de alimentação:** são às portas de saída de tensão do arduino, temos três portas: porta 3,3 V cuja saída trabalha em 3,3 V, porta 5 V cuja saída trabalha em 5 V e a porta Vin cuja saída trabalha com a tensão de entrada do arduino.
- **Led porta 13:** led conectado a porta 13 do arduino.
- **Leds das portas RX TX:** leds conectados às portas RX TX, sendo que o led TX serve para indicar a transmissão de dados e o RX para indicar a recepção de dados.
- **Processador ATMEGA328:** o processador é responsável pelo processamento da lógica de programação.
- **Led de power:** led que acende quando o arduino está ligado.
- **Conector ICSP:** o conector ICSP, é o conector in circuit system programmer, que se refere a capacidade de programar Arduinos diretamente dos seus microcontroladores.
- **Conjunto microcontrolador e cristal para USB:** esse conjunto possui um microcontrolador ATMEGA16U2 e um cristal externo de 16 MHz, e é responsável pelo gerenciamento da porta USB.
- **Circuito de proteção de sobretensão na USB:** responsável por proteger a entrada USB de sobretensão.
- **Controlador de tensão de alimentação:** esse controlador é responsável por verificar se a tensão DC está presente, se não estiver, deixa que a tensão da USB alimente o circuito.
- **Regulador de tensão de 5 V:** serve para regular a tensão em 5 V.
- **Regulador de tensão de 3,3 V:** serve para regular a tensão em 3,3 V.
- **Cristal para clock:** serve para gerar o clock.

3.2.2 Drivers de potência

Os drivers de potência são dispositivos que conservam sinais fundamentais de entrada em suas saídas, potencializando e fornecendo maior corrente elétrica para equipamentos atuadores. Os drivers de potência podem ser formados por elementos eletromecânicos (relés) e semicondutores (diodos, transistores, e circuitos integrados).

No presente projeto, os drivers têm a função de, a partir dos sinais originados pelo Arduino, atender a demanda dos motores de passo utilizados.

A equipe do projeto optou por desenvolver para a mesa cartesiana que necessita de dois atuadores (motores de passo), drivers individuais para cada motor devido ao custo que seria menor.

Tabela 1 – Parâmetros do driver de potência.

Parâmetro	Magnitude
Tensão lógica mínima	3v
Tensão lógica máxima	5,5v
Corrente contínua por fase	1A
Corrente máxima por fase	2A
Tensão de operação mínima	8v
Tensão de operação máxima	35v

Fonte: Próprio Autor, 2021.

A construção dos drivers que controlam os motores de passo da mesa cartesiana foi baseada em um circuito eletrônico para motores que trabalham com tensão de 12 V DC e até 10 A de corrente elétrica.

INSERIR IMAGEM AQUI

Figura 16 – Driver fabricado pela equipe do projeto.

Fonte: Próprio autor.

O driver criado foi utilizado para controlar motores de passo e pode operar com tensões entre 8 V e 35 V e entregar até 35 V por bobina. A Figura 17 mostra o driver com os respectivos componentes.

INSERIR IMAGEM AQUI

Figura 17 – Portas do driver fabricado pela equipe do projeto.

Fonte: Próprio autor.

AQUI EMBAIXO UMA EXPLICAÇÃO DA IMAGEM DAS PORTAS, EXPLICANDO PARA QUE SERVE CADA PORTA COMO SE FOSSE UM DATASHEET DO DRIVER CRIADO

3.2.3 Atuadores

Atuadores são equipamentos ou dispositivos elétricos que convertem energia hidráulica, pneumática ou elétrica em energia mecânica. A energia gerada nos atuadores é transformada em movimento em vários tipos de processos.

Os atuadores utilizados neste projeto foram os elétricos que se dividem em motores elétricos de corrente alternada e contínua, servomotores e motores de passo. Esses atuadores

convertem pulsos elétricos recebidos em seus terminais em energia mecânica transformando-a em movimento rotativo do motor, no caso do projeto os motores de passo que controlam o movimento dos fusos da mesa cartesiana. Os atuadores elétricos atendem a comandos manuais ou programáveis, localmente ou remotamente. Eles se destacam por uma transmissão de potência simplificada e eficiente do ponto de vista de energia.

Os motores de passo são atuadores eletromagnéticos com capacidade de converter pulsos elétricos digitais recebidos em movimento de rotação incremental do eixo do motor. Sua aplicação é necessária em movimentos rotativos com alta precisão que necessitam de controle de posição e velocidade. A sua escolha foi definida pela precisão, baixo custo de aquisição e manutenção.

A composição de um motor de passo contém um rotor e um estator que é a parte fixa do gerador elétrico, nessa está situado um conjunto de bobinas responsáveis pelo giro do rotor. Para que haja o movimento, as bobinas estão ligadas aos terminais do motor, organizadas em pares, interligadas entre si e posicionadas em sentidos opostos para que quando forem energizadas, der o movimento de rotação do motor devido às interações magnéticas.

O atributo que distingue o motor de passo dos demais motores elétricos é a capacidade de realizar passos, que são rotações discretas incrementais e precisas. 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. Para que haja um controle de quantos passos serão dados, o motor necessita de largura de pulso a fim de enviar a corrente adequada para cada passo. A Figura 18 é um exemplo para melhor entendimento do conceito de passo.

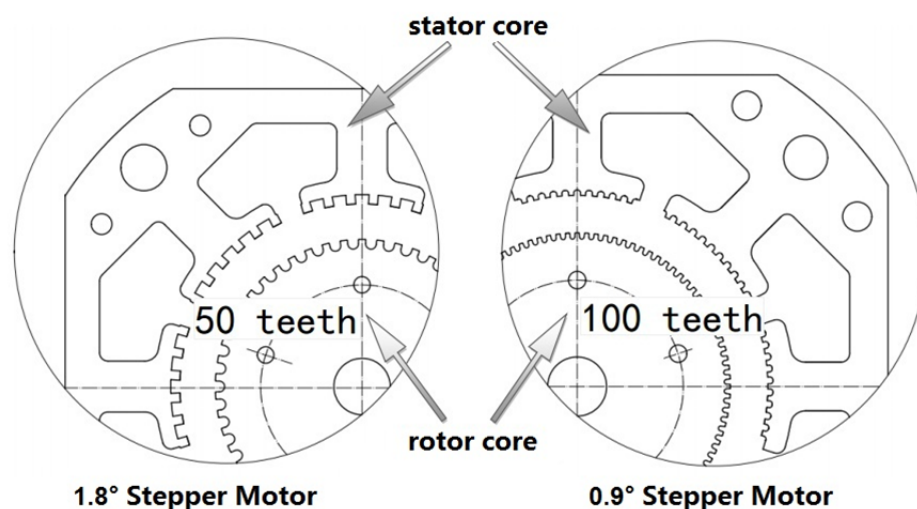


Figura 18 – Conceito didático do motor de passo.

Fonte: <https://www.fernandok.com>.

A Figura 18 mostra um motor de passo com cinquenta dentes de precisão, portanto combinando o número de dentes com as quatro fases de um motor bipolar temos duzentos passos.

A equação 3.1 calcula o número de passos de uma volta executada pelo motor onde, o número de passos (n_p) é igual ao número de dentes (n_d) multiplicado pelo número de fases (n_f)

$$n_p = n_d \cdot n_f \quad (3.1)$$

A precisão do motor é definida por trezentos e sessenta graus divididos pelo número de passos. Portanto, trezentos e sessenta divididos por duzentos é igual a um vírgula oito graus de precisão. Já o segundo motor de passo possui cem dentes de precisão, portanto a precisão é de zero vírgula nove graus, o que indica que é um motor com maior precisão que o de cinquenta dentes.

Para aumentar a precisão dos motores é possível subdividir o passo de um motor em menores passos fornecendo ao mesmo tempo corrente elétrica em duas fases. Essa forma de trabalho é chamada de micropassos.

Logo, quando é fornecido a mesma magnitude de corrente a duas fases, um campo magnético de mesma magnitude é gerado, resultando em um movimento angular com a metade do passo original, essa configuração é chamada de meio passo. Assim, ao aplicar magnitudes de corrente diferentes a duas fases, o rotor se desloca proporcionalmente ao campo eletromagnético mais forte.

Os motores de passo utilizados no projeto da mesa cartesiana possuem 5 kgf.cm de torque, passo de 1.8° e corrente máxima de 2 Ampères por fase. O incremento de rotação e o torque são definidos conforme o modo de excitação que pode ser por passo completo, meio passo e micropasso explicadas anteriormente. O passo é dividido em quatro, oito ou dezesseis na maioria das vezes, mas também, atualmente se encontra sistemas capazes de dividir um passo em milhares de vezes.

INSERIR IMAGEM AQUI

Figura 19 – Esquema elétrico do motor de passo.
Fonte: Próprio autor.

As Tabelas 2, 3 e 4 mostram a sequência de polaridades aplicadas no motor no movimento de sentido horário.

Tabela 2 – Sequência de passos com uma fase (wavestep) para movimentação no sentido horário.

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

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Tabela 3 – Sequência de passos com duas fases (fullstep) para movimentação no sentido horário.

Passo	A+	B+	A-	B-	Decimal
1	1	0	0	1	9
2	0	0	1	1	3
3	0	1	1	0	6
4	1	1	0	0	12

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Tabela 4 – Sequência de passos com meio passo (halfstep) para movimentação no sentido horário.

Passo	A+	B+	A-	B-	Decimal
1	1	0	0	1	9
2	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	3
4	0	0	1	0	2
5	0	1	1	0	6
6	0	1	0	0	4
7	1	1	0	0	12
8	1	0	0	0	8

Fonte: Próprio Autor, 2021.

As Tabelas 5, 6 e 7 mostram a sequência de polaridades aplicadas no motor no movimento de sentido anti-horário.

A Tabela 8 apresenta alguns parâmetros dos motores de passo.

Tabela 5 – Sequência de passos com uma fase (wavestep) para movimentação no sentido anti-horário.

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

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Tabela 6 – Sequência de passos com duas fases (fullstep) para movimentação no sentido anti-horário.

Passo	A+	B+	A-	B-	Decimal
1	1	1	0	0	12
2	0	1	1	0	6
3	0	0	1	1	3
4	1	0	0	1	9

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Tabela 7 – Sequência de passos com meio passo (halfstep) para movimentação no sentido anti-horário.

Passo	A+	B+	A-	B-	Decimal
1	1	0	0	0	8
2	1	1	0	0	12
3	0	1	0	0	4
4	0	1	1	0	6
5	0	0	1	0	2
6	0	0	1	1	3
7	0	0	0	1	1
8	1	0	0	1	9

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Tabela 8 – Parâmetros dos motores de passo.

Parâmetros	Magnitude
Número de passos por revolução	200 (1,8 graus por passo)
Corrente de operação	800 mA
Tensão de alimentação	12 V
Configuração das bobinas	Bipolar (4 fios)

Fonte: Próprio Autor, 2021.

3.2.4 Fonte de alimentação

A fonte de alimentação projetada para transformar a tensão elétrica alternada em corrente contínua.

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.

A Tabela 9 apresenta a demanda de energia elétrica de cada dispositivo.

A Tabela 9 indica que a placa controladora Arduino opera no intervalo de tensão de 7 V a 12 V, os drivers de potência no intervalo de 8 V a 35 V, os motores de passo no intervalo de 5 V a 36 V e o optoacoplador no intervalo de 5V a 35 V.A tensão de saída de 12 V foi determinada como melhor opção para o projeto.

Outro parâmetro que a Tabela 9 apresenta é a corrente elétrica mínima para a operação

Tabela 9 – Demanda de energia elétrica de cada componente do sistema.

Componente	Quantidade	Tensão	Consumo	Consumo Total
Arduino	1	7 a 12 V	800 mA	800 mA
Driver	2	8 a 35 V	2 A	4 A
Motor de passo	2	5 a 36 V	2 A	4 A
Optoacoplador	2	5 a 35 V	5mA	10 mA
Resultado	-	12 V	-	8,18 A

Fonte: Próprio Autor, 2021.

do circuito. A placa controladora necessita de 800 mA, os drivers de potência necessitam de 2 A cada, como são 2 drivers, 4 A são necessários, os motores de passo consomem 2 amperes cada, como o projeto contém 2 motores, 4 Amperes são necessários e os optoacopladores necessitam de 10 mA cada, como o projeto contém 2 optoacopladores, 20mA são necessários. Decidiu-se acrescentar uma margem de segurança adicional de 30% na corrente, então, considerou-se uma corrente mínima necessária de 10,64 A.

Corrente necessária = $1,3 * (\text{Arduino} + 2 * \text{driver de potência} + 2 * \text{motor de passo} + 2 \text{ optoacopladores})$

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.

INSERIR IMAGEM AQUI

Figura 20 – Fonte do sistema.

Fonte: Próprio autor.

3.2.5 Acopladores ópticos

Os acopladores ópticos ou optoacopladores são dispositivos que realizam a transferência de sinais de um circuito para outro por meio de um feixe de luz sem a ligação elétrica.

A aplicação dentro do projeto é o isolamento elétrico que pode ser estabelecido entre os circuitos de controle de potência, protegendo os circuitos sensíveis a uma alta tensão como a placa controladora Arduino.

A sua composição contém uma fonte emissora de luz (LED) e um sensor fototransistor sensível às variações espectrais da fonte emissora. Seu funcionamento é baseado no efeito fotoelétrico, onde o diodo LED produz um feixe de luz infravermelha polarizando a base do fototransistor impondo uma condução entre base e emissor.

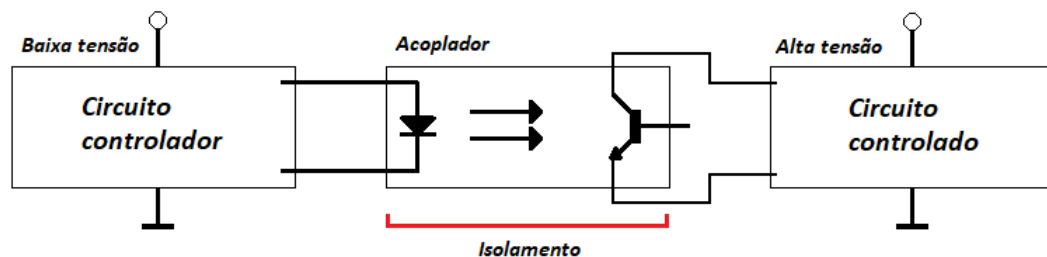


Figura 21 – Funcionamento do acoplador no sistema.

Fonte: Próprio autor.

O optoacoplador escolhido para o projeto foi o PC 817 por já estar disponível no Laboratório de Sistemas Térmicos.

3.2.6 Encoders

Geradores de pulsos ou encoders são sensores/transdutores eletromecânicos responsáveis pelo sistema de controle de posição transformando a medida de posição de algum objeto, seja linear ou angular, em sinal elétrico digital que é transmitida à placa controladora, também conseguem converter movimentos circulares ou lineares em pulso elétricos.

Um encoder tem a capacidade de quantização de distâncias, controle de velocidades, medição de ângulos, medição de posição, medição de deslocamento relativo e etc. Sua composição contém um disco com marcações, um emissor e um receptor. Conforme o disco gira, vão sendo contadas às marcações e o emissor envia um sinal à placa controladora que por sua vez executa cálculos de distâncias, velocidades, ângulos, número de rotações e etc.

O princípio de funcionamento é dividido em três tipos, sendo eles: tacômetro, incremental e absoluto.

O encoder do tipo tacômetro possui um sinal de saída digital responsável em emitir um pulso para cada incremento captado no deslocamento. Este é utilizado na medição de velocidade e também no deslocamento angular unidirecional. O encoder incremental conta com sistema eletrônico externo responsável pela interpretação de posição, este dispositivo utiliza dois ou mais elementos geradores de sinal possuindo a capacidade de rotacionar por quantas revoluções forem necessárias.

E o encoder absoluto utiliza várias faixas de saídas com leitura em paralelo e são limitados a uma revolução. Os dados podem ser recuperados, se uma falha no sistema ocorrer, devido a representação binária da posição angular do eixo.

3.2.7 Chaves fim de curso

As chaves fim de curso são dispositivos eletromecânicos usados para limitação de campo de movimento de eixos, como os presentes na mesa cartesiana. Esses componentes têm a capacidade de mudança de estado de conexão em circuitos, alternando o estado de aberto para fechado e vice-versa (ALCIATORE; HISTAND, 2014). Seu estado inicialmente pode ser tanto normalmente aberto como normalmente fechado alterando seu estado por pino, gatilho, roldana, haste alavanca, etc.

Uma chave fim de curso é composta basicamente por três elementos, sendo eles:

- a) **Caixa:** Pode ser metálica ou plástica, dependendo do tipo e abriga os contatos e o atuador.
- b) **Contato:** É usado dentro do circuito a fim de fazer com que a atuação da chave fim de curso interrompa ou acione algum outro dispositivo.
- c) **Atuador:** Recebe a força externa exercida para o acionamento da troca de estado.

3.3 SISTEMA DE SOFTWARE

A seguir será descrito o desenvolvimento do sistema de software.

3.3.1 Plataforma de prototipação Arduino IDE

A plataforma de prototipação Arduino IDE (Integrated development environment ou ambiente de desenvolvimento integrado) é um software que permite o desenvolvimento e envio de códigos compilados direto para o microcontrolador. Essa plataforma tem a flexibilidade de ser utilizada em vários sistemas operacionais e foi desenvolvida na linguagem Java oferecendo suporte de desenvolvimento na linguagem C e C++. O download da plataforma foi realizado através do link: <https://www.arduino.cc/en/software>

3.3.2 Logica de programação

O desenvolvimento da lógica de programação da placa controladora foi organizado de maneira modular usando orientação a objetos para uma manutenção facilitada e um entendimento mais claro do código.

As operações que o software deve executar foram apresentadas no fluxograma abaixo.

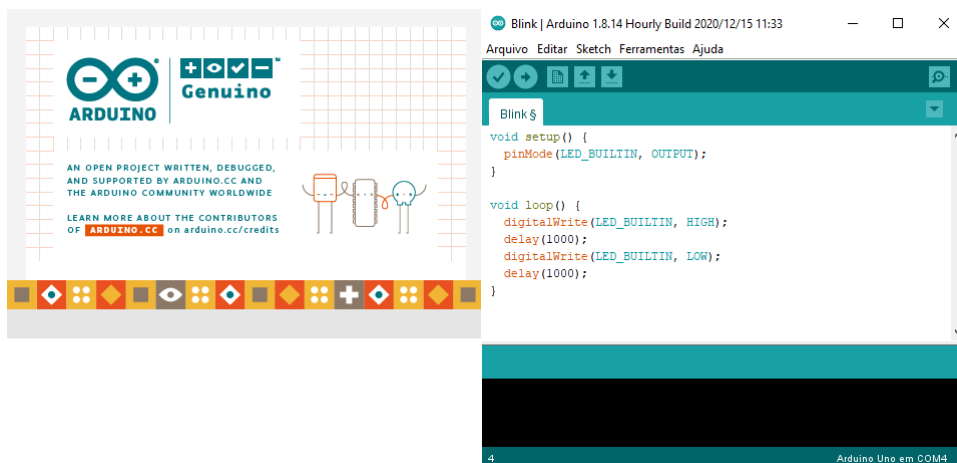


Figura 22 – Ambiente de desenvolvimento integrado Arduino.
Fonte: Próprio autor.

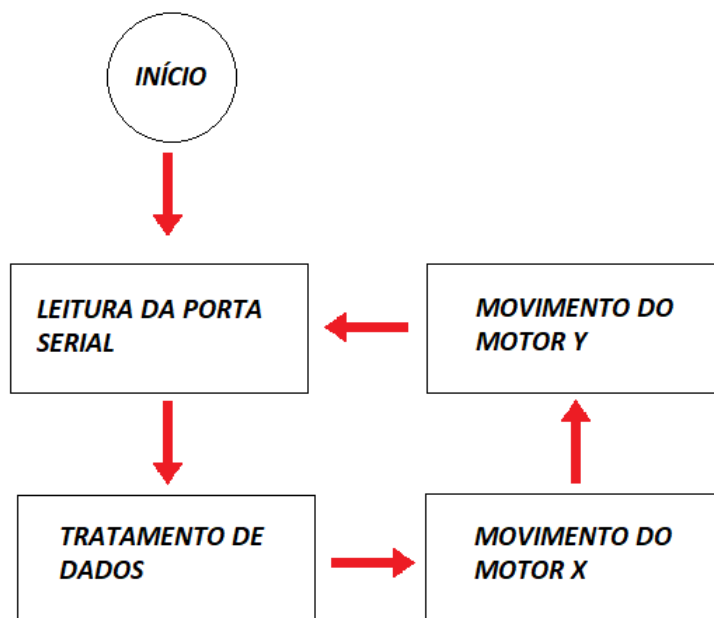


Figura 23 – Fluxo de execução do software.
Fonte: Próprio autor.

A Figura 23 apresenta um fluxograma simplificado da lógica de programação presente na placa controladora Arduino que inicialmente tem como primeiro comando ficar esperando o envio de dados pela porta Serial, se caso há esse envio, então o programa faz a leitura da porta serial, armazenando os dados em variáveis para em seguida realizar o tratamento de dados. Após o tratamento de dados o software dará o comando de movimentação do motor que controla o fuso do eixo horizontal (eixo X), em seguida, assim que o motor do eixo X parar sua rotação, o comando de movimentação do motor do eixo vertical (eixo Y) será acionado. Finalmente, após o fim da execução do motor que controla o eixo Y, o software volta a analisar se é enviado dados pela porta serial.

3.3.3 Diagrama de classes

Diagrama de classe é uma representação da estrutura e relações entre classes que um software possui facilitando e servindo de modelo para criação de objetos. Esse diagrama permite modelar classes com seus atributos e métodos além da relação entre objetos.

Para o desenvolvimento do software da placa controladora cuja linguagem é C++ que é fundamentada em orientação a objetos, foi definido que seria a melhor opção realizar um diagrama de classes antes do desenvolvimento do código. Sendo assim a Figura 24 apresentada abaixo é o resultado do que foi modelado.

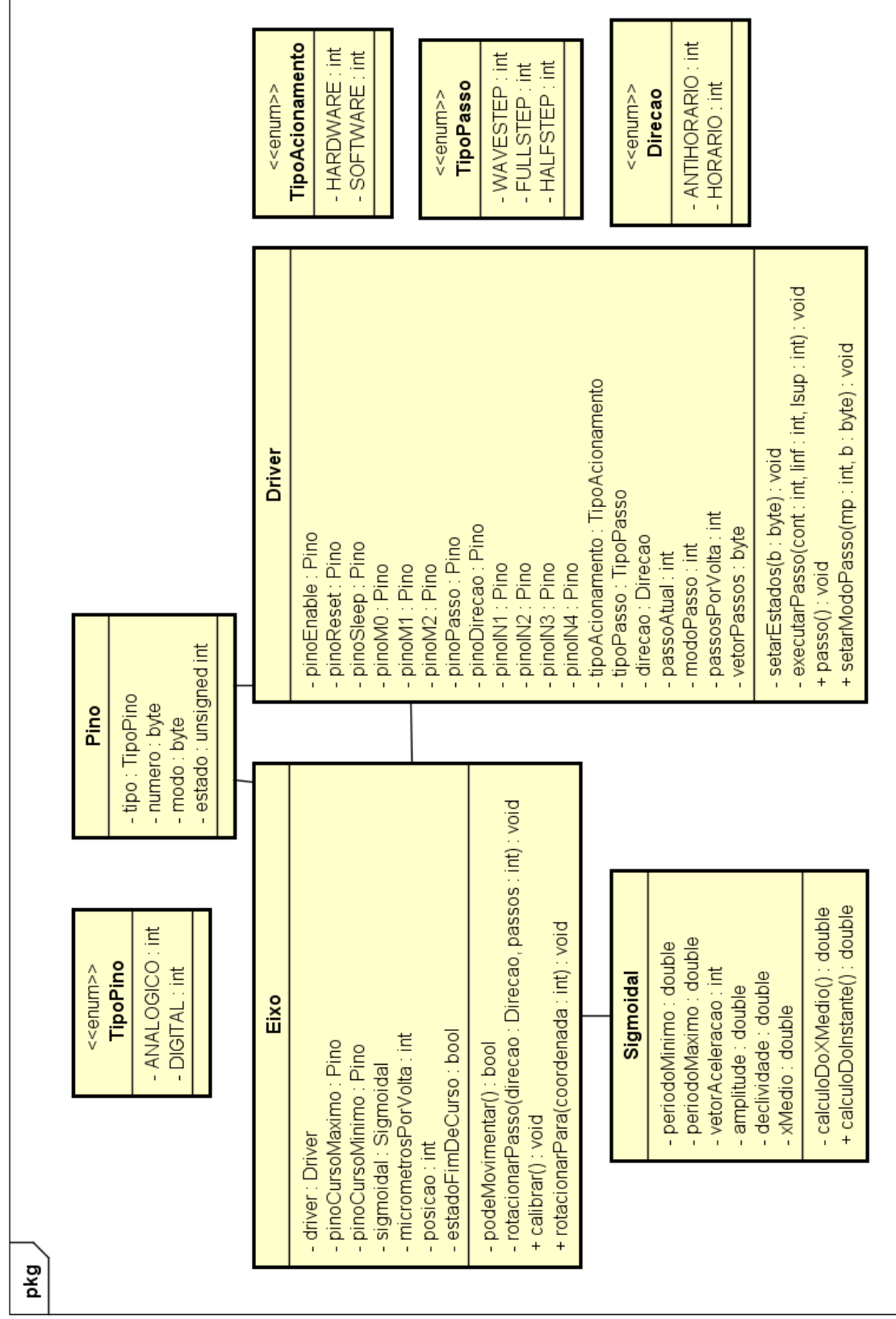


Figura 24 – Diagrama de classes do sistema de software presente no Arduino.

Fonte: Próprio autor.

A seguir será explicado este diagrama classe a classe.

“Sigmoidal” é a classe responsável pela aceleração sigmóide nos motores de passo, essa classe utiliza a função sigmóide que é uma função matemática com o gráfico parecido com a letra S. Para o desenvolvimento da mesa cartesiana houve a preocupação dos projetistas em configurar os motores de passo com uma aceleração variável para maior vida útil dos equipamentos, já que com aceleração constante pode causar forças desnecessárias durante o processo de rotação.

A Tabela 10 apresenta a declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe “Sigmoidal”.

Tabela 10 – Declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe Sigmoidal.

Declaração	Funcionalidade
- periodoMinimo: double	Período máximo do passo do motor.
- periodoMaximo: double	Período mínimo do passo do motor.
- vetorAceleracao: int	Determina se a curva será de aceleração (1) ou desaceleração (-1)
- amplitude: double	Amplitude da aceleração, diferença do período máximo menos o período mínimo
- declividade: double	Inclinação da curva de aceleração, o quão rápido o motor irá acelerar
- xMedio: double	É a metade do número de iterações necessários para percorrer a curva sigmoidal
- calculoDoXMedio(): double	Calcula o número de iterações necessários para percorrer metade da curva sigmoidal.
+ calculoDoInstante(): double	Calcula um instante na curva tendo como entrada uma iteração

Fonte: Próprio Autor, 2021.

A classe “Sigmoidal” tem como atributos privados: “periodoMaximo” e o “periodoMinimo” que são os períodos que o motor sofrerá os pulsos nas bobinas, “vetorAceleracao” que determina se a curva sigmoidal terá um comportamento de aceleração ou desaceleração, “amplitude” que é a diferença entre o “periodoMaximo” e o “periodoMinimo” e é utilizada na equação do cálculo do X médio e do cálculo do instante, “declividade” que determina a inclinação da curva de aceleração (o quão rápido o motor irá acelerar), “xMedio” que é a metade do número de passos (iterações) que o motor precisará para acelerar e é utilizado no cálculo do instante.

Como operações, a classe “Sigmoidal” tem os métodos de acesso getters e setters que acessam os atributos privados citados acima, esses métodos são necessários para cumprir o princípio de encapsulamento da orientação a objetos protegendo a lógica da classe. A classe

“Sigmoidal” dispõe de duas operações, as quais são definidas por: “calculoDoXMedio”, que calcula o valor do atributo xMedio, “calculoDoInstante”, que calcula o período a ser aplicado em um determinado instante, esse cálculo é utilizado na lógica do método “rotacionarPasso” da classe “Eixo”.

“Pino” é a classe que representa os pinos da placa Arduino, pois devido ao número alto de vezes que foi necessário a utilização dos pinos, foi definido que seria melhor a criação de uma classe para facilitar as operações com pinos.

A Tabela 11 apresenta a declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe “Pino”.

Tabela 11 – Declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe Pino.

Declaração	Funcionalidade
- tipo: TipoPino	Tipo do pino (ANALOGICO, DIGITAL).
- numero: byte	Número do pino.
- modo: byte	Modo do pino (OUTPUT, INPUT).
- estado: unsigned int	Estado do pino (LOW, HIGH) (0, 255) (0, 1023).

Fonte: Próprio Autor, 2021.

A classe “Pino” possui como atributos privados: “tipo”, que é o tipo de entrada do pino que pode ser analogico ou digital, “numero”, que é o número de uma determinada porta na placa, “modo” que define se a porta é de entrada ou saída de dados, e “estado”, que pode estar ligado ou desligado nas portas digitais, ter valores de 0 a 255 nas portas PWM e de 0 a 1023 nas portas analogicas. Como operações, a classe Pino tem os métodos de acesso getters e setters que acessam os atributos privados citados acima.

“Driver” é a classe responsável pelo controle digital do driver de potência, com ela é possível definir o modo do passo dos motores, executar o pulso que dará movimento ao motor de passo, ligar e desligar o driver, deixá-lo no modo “sleep” e também “reseta-lo”.

A Tabela 12 apresenta a declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe “Driver”

A classe “Driver” possui os atributos privados: “pinoEnable”, que permite ligar ou desligar o driver, “pinoReset”, que reinicia o driver, “pinoSleep”, que ativa o modo sleep do driver, “pinoM0”, “pinoM1” e “pinoM2”, que definem o modo do Passo, “pinoPasso” e “pinoDirecao” que são os pinos de execução de passo e configuração de direção para tipo de acionamento via hardware, “pinoIN1”, “pinoIN2”, “pinoIN3” e “pinoIN4” que são os pinos referentes ao controle das bobinas do motor de passo para tipo de acionamento via software, “tipoAcionamento” para

Tabela 12 – Declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe Driver.

Declaração	Funcionalidade
- pinoEnable: Pino	Ativar e desativar o driver.
- pinoReset: Pino	Resetar o driver.
- pinoSleep: Pino	Ativar e desativar o modo sleep do driver.
- pinoM0: Pino	Pino M0 do modo de passo do driver.
- pinoM1: Pino	Pino M1 do modo de passo do driver.
- pinoM2: Pino	Pino M2 do modo de passo do driver.
- pinoPasso: Pino	Pino de execução do passo do driver.
- pinoDirecao: Pino	Pino de configuração da direção do driver.
- pinoIN1: Pino	Pino IN1 do motor de passo.
- pinoIN2: Pino	Pino IN2 do motor de passo.
- pinoIN3: Pino	Pino IN3 do motor de passo.
- pinoIN4: Pino	Pino IN4 do motor de passo.
- tipoAcionamento: TipoAcionamento	Tipo de acionamento do driver: (SOFTWARE, HARDWARE).
- tipoPasso: TipoPasso	Tipo do passo do driver: (WAVESTEP, FULLSTEP, HALFSTEP).
- direcao: Direcao	Configuração da direção do driver: (ANTIHORARIO, HORARIO).
- passoAtual: int	PassoAtual é o índice de acesso as informações do vetor de passos.
- modoPasso: int	Pino do modo de passo do driver.
- passosPorVolta: int	Quantidade de passos a cada volta do motor de passo.
- vetorPasso: byte	Vetor de bytes de sequência dos passos.
- setarEstadoModo (pM0:bool, pM1:bool, pM2:bool): void	Definir o modo de passo do driver passando como parâmetro os estados dos pinos M0, M1, M2.
- setarEstados(b: byte):void	Definir estados dos pinos IN1, IN2, IN3, IN4 do motor de passo.
- passo():void	Executar um passo do motor.
+ executarPasso(cont:int, linf:int, lsup:int):void	Executar um passo do motor com a lógica de sequência dos passos.
+ setarModoPasso(mp:int, b:byte):void	Definir o modo de passo do driver.

Fonte: Próprio Autor, 2021.

configuração do tipo de acionamento do driver que pode ser via software ou hardware conforme a necessidade de cada tipo de driver utilizado, “tipoPasso” para configuração do tipo de passo do driver que pode ser (wavestep, fullstep, halfstep), “direcao”, que define o sentido do movimento,

“passoAtual” que é o índice de acesso às informações do vetor de passos, “modoPasso”, que define o modo do passo do driver, “passosPorVolta”, que define a quantidade de passos a cada volta do motor como por exemplo, 200 passos de 1,8 graus resultando em 360 graus.

Como operações, a classe “Driver” tem os métodos: métodos de acesso getters e setters que acessam os atributos privados da classe, os métodos: “setarEstados”, que define os estados dos pinos IN1, IN2, IN3, IN4 do motor de passo, “passo” que executa um passo do motor, “setarModoPasso”, que define o modo de passo do driver e “executarPasso”, executa um passo do motor com a lógica de configurações de passos.

“Eixo” é a classe que foi desenvolvida a lógica de movimentação dos eixos da mesa cartesiana. Com ela é possível rotacionar definindo a coordenada cartesiana de preferência, verificar se a posição do eixo está ativando a chave de fim de curso.

A Tabela 13 apresenta a declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe “Eixo”.

Tabela 13 – Declaração e funcionalidade dos atributos e métodos da classe Eixo.	
Declaração	Funcionalidade
- driver: Driver	Define as configurações do driver que controla os motores de passo.
- sigmoidal: Sigmoidal	Define a aceleração sigmoidal dos motores de passo.
- pinoCursoMinimo: Pino	Pino do curso mínimo da chave fim de curso.
- pinoCursoMaximo: Pino	Pino do curso máximo da chave fim de curso.
- posicao: int	Pino da posição atual do eixo.
- estadoFimDeCurso: bool	Pino do estado de fim de curso que pode inicializar LOW ou HIGH.
- podeMovimentar(direcao:bool):bool	Verificar se o motor está no fim de curso.
- rotacionarPassos(direcao:bool,passos:int):void	Rotacionar o motor, tendo como parâmetros de entrada a direção e a quantidade de passos.
+ rotacionarPara(coordenada:double):void	Rotacionar o motor tendo como parâmetro a coordenada cartesiana do eixo.

Fonte: Próprio Autor, 2021.

A classe “Eixo” possui os atributos privados: “driver”, que é responsável pelas configurações e operações do driver de potência que controla o motor de passo acoplado ao eixo, “sigmoidal” que define a aceleração variável do motor, “pinoCursoMinimo” e “pinoCursoMa-

ximo”, que são os pinos referentes às chaves fim de curso de cada eixo, “estadoFimDeCurso”, que indica o estado que a chave fim de curso inicializará estando desativada.

Como operações, a classe tem os métodos: métodos de acesso getters e setters que acessam os atributos privados da classe, os métodos: “podeMovimentar”, que indica se o motor de passo pode executar o próximo passo ou se já chegou ao fim do curso, “rotacionarPassos”, que rotaciona o eixo tendo como parâmetros de entrada uma direção e uma quantidade de passos a serem executadas e “rotacionarPara”, que rotaciona o eixo tendo como parâmetros de entrada uma coordenada cartesiana.

Além das classes utilizadas, o software possui a sketch principal que é responsável pela configuração das informações iniciais, criação dos objetos na memória, configuração dos atributos de cada objeto, execução da leitura pela porta serial, tratamento de dados recebidos e a movimentação dos motores. A Figura 25 apresenta um diagrama geral da organização do software.

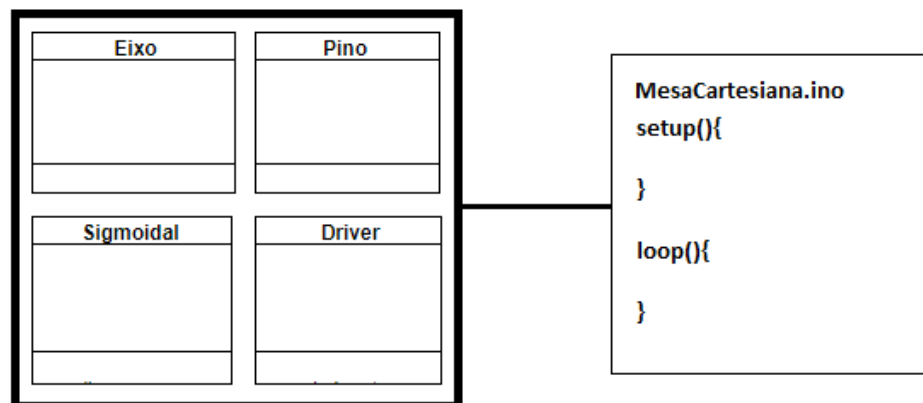


Figura 25 – Diagrama da organização geral do software.

Fonte: Próprio autor.

O arquivo MesaCartesiana.ino é o principal, ele instancia os objetos das classes: “Pino”, “Sigmoidal”, “Driver” e “Eixo” e também tem a responsabilidade de receber às coordenadas através da comunicação serial e às enviar para o objeto da classe “Eixo” que fará a rotação dos motores.

3.4 INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS

Nesta seção será descrito como os sistemas são integrados mostrando como os três sistemas se comunicam. A Figura 26 é um fluxograma que descreve de maneira gráfica a integração dos sistemas.

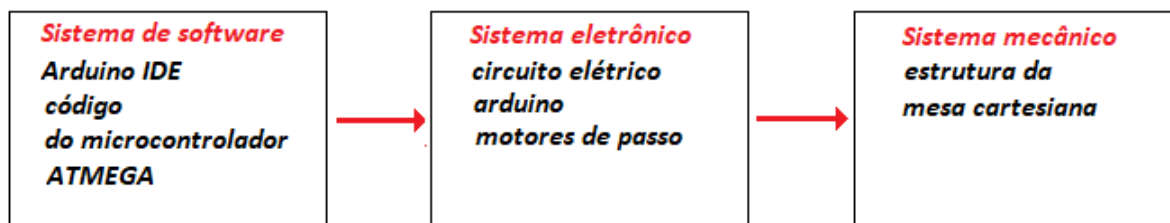


Figura 26 – Fluxograma para apresentar a integração sistemas.

Fonte: Próprio autor.

O sistema de software se comunica com o sistema eletrônico através do envio de dados pela comunicação Serial presente no Arduino IDE para o software presente no microcontrolador ATMEGA da placa Arduino. Por sua vez, o microcontrolador envia um comando elétrico ao sistema eletrônico que acionará os motores de passo que convertem a energia elétrica em mecânica transmitindo o movimento dos fusos da estrutura do sistema mecânico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para apresentação dos resultados encontrados ao longo da implantação da mesa cartesiana no laboratório de sistemas térmicos e uma posterior discussão, os temas foram divididos de acordo com a metodologia (seção 3). Ou seja, primeiramente é apresentado os resultados do sistema mecânico, posteriormente os resultados do sistema eletrônico, em seguida é mostrado os resultados da programação do sistema de software. Por fim, é realizada uma análise dos testes experimentais.

4.1 SISTEMA MECÂNICO

A Figura X mostra uma fotografia da mesa cartesiana possibilitando uma melhor compreensão do funcionamento dos seus componentes.

4.2 SISTEMA ELETRÔNICO

A Figura X mostra um esquema elétrico que comanda os motores de passos presentes na estrutura da mesa cartesiana possibilitando uma melhor compreensão do funcionamento dos seus componentes.

4.3 SISTEMA DE SOFTWARE

O sistema de software do projeto foi fundamentado na metodologia, sendo assim para o desenvolvimento do código foi utilizado a plataforma de prototipação Arduino IDE respeitando o diagrama de classes mostrado na seção 3.3.3.

4.4 ANÁLISE DOS TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais foram divididos em etapas. Primeiramente foi verificado o funcionamento dos sistemas separadamente. Sendo assim, foi verificado se a estrutura mecânica estava bem montada. Posteriormente foi verificado o funcionamento dos componentes eletrônicos, em seguida foi desenvolvido um código fonte simplificado para verificar os movimentos dos eixos. Por fim, o código fonte desenvolvido foi carregado no Arduino para que testes de desempenho fossem realizados. Assim, para testar o desempenho da mesa cartesiana desenvolvida, foram definidos testes ao posicionamento e a aceleração para validação do projeto. No teste ao posicio-

namento, a mesa percorre alguns pontos distintos e em seguida é verificado o deslocamento nos dois eixos com um paquímetro. Já no teste a aceleração,

4.4.1 Teste ao posicionamento

Os motores de passo não possuem a capacidade de quantização de distâncias, dessa forma para garantir que a posição da mesa corresponde a posição pretendida se faz o uso do encoder. A origem é o único ponto da mesa conhecido pelo software, pois é possível através das chaves fim de curso impedir a movimentação dos motores, essa lógica de chaves fim de curso é aproveitada na inicialização do programa para a setagem da coordenada (0,0). Após a inicialização é possível que alguns erros aconteçam como: algum erro no software ou falha no hardware ocorrendo uma descalibração da mesa. Assim, para validar a funcionalidade do software e hardware foi efetuado o seguinte teste:

- a) Cinco coordenadas (x,y) foram estipuladas incluindo a coordenada mínima e máxima da mesa onde estavam presentes as chaves de início e fim de curso.
- b) A medida que uma coordenada foi executada pela mesa, o deslocamento foi verificado pelo paquímetro.
- c) Após o teste terminar, o regresso a coordenada (0,0) foi efetuado para repetição do processo.

A tabela X mostra que não existe diferença mensurável entre a posição pretendida e a medida comprovando a funcionalidade do sistema, bem como a precisão dos motores de passo.

4.4.2 Teste a aceleração

Os motores de passo funcionam através do envio de pulsos em um determinado intervalo de tempo, sendo assim conforme o intervalo de tempo que é enviado esse pulso elétrico, a velocidade do motor é modificada. Então, se conclui que:

- a) Para um intervalo de tempo fixo, a velocidade do motor é constante.
- b) Para um intervalo de tempo que diminui ao longo do tempo, a velocidade aumenta. (Aceleração).
- c) Para um intervalo de tempo que aumenta ao longo do tempo, a velocidade diminui. (Desaceleração).
- d) Para realizar a variação no intervalo de tempo para o envio de pulsos elétricos, foi escolhida uma curva sigmóide que é desenhada em um gráfico de Período x Iterações

CONTINUAR EXPLICANDO

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral do projeto que consiste na movimentação de instrumentos de medição em um sistema de coordenadas cartesianas foi atendido. Nesse sentido, os objetivos específicos de projetar a mesa cartesiana, criar o sistema de comunicação “mesa-software” e desenvolver o software de comando foram contemplados. Primeiramente, para a criação da mesa cartesiana foi projetada uma estrutura mecânica em formato TAL. Posteriormente, para a comunicação entre a mesa e o software foi desenvolvido TAL. Por fim, para o software que comandará a mesa foi desenvolvido TAL. Além disso, os testes experimentais de desempenho quanto ao posicionamento e aceleração mostraram que TAL. A documentação deste trabalho foi realizada a fim de facilitar o entendimento para o desenvolvimento de outros projetos parecidos e assim estender o impacto deste trabalho em outras instituições de ensino. Isso permitirá que um maior número de pesquisadores possam realizar a captura de dados para experimentos de forma automatizada em túneis de vento. O projeto está disponível para montagem em um repositório online no endereço <<https://github.com/abaldezjr/MesaCartesiana>>. Com este trabalho, foi possível utilizar diversos dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Mecânica utilizando-os de forma integrada, visto que envolveu a concepção de um sistema mecânico movimentado por motores elétricos, além de aproveitar-se do desenvolvimento de software na integração do projeto como um todo.

5.1 CRÍTICAS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

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

- LALALALA
- LALALALA
- LALALALA

REFERÊNCIAS

- ALCIATORE, D. G.; HISTAND, M. B. **Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.
- BUTIGNOL, M. R. Adequação de uma mesa xyz para fins didáticos. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/571/ADEQUACAO_DE_UMA_MESA_XYZ_PARA_FINS_DIDATICOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- CAMARGO, L. F. S. et al. Mesa de coordenadas xy para aplicação em microengenharia com cnc: projeto e análise. 1988. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/75448/80422.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
- CARMINATTI, L. J.; KONRATH, R. Desenvolvimento de um túnel de vento subsônico com foco no ensino didático. **Anais da Engenharia Mecânica/ISSN 2594-4649**, v. 4, n. 1, p. 17–33, 2019. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/engmec/article/view/229/221>>.
- HOSS, D. L. Implantação de controle de velocidade em túnel de vento movido à motor de combustão para testes de turbinas eólicas. p. 121, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/532/Implementa%20de%20controle%20de%20velocidade%20em%20t%20nel%20de%20vento.pdf?sequence=1>>.
- JOGLEKAR, B.; MOURYA, R. M. Design, construction and testing open circuit low speed wind tunnel. **International Journal of Engineering Research and Reviews**, v. 2, n. 4, p. 1–9, 2014.
- PRITCHARD, P. J.; MITCHELL, J. W. **Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics**. John Wiley & Sons, 2005. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/Pritchard-Fox-McDonalds_2011_8ed_Fluid-Mechanics.pdf>.
- RAMOS, L. G. d. R. Desenvolvimento de um sistema de deslocamento bi-axial para aplicação em túnel aerodinâmico. 2018.
- ROCHA, F.; SERRANTOLA, W.; LOPEZ, G. N.; TORGA, D.; CARVALHO, M.; SOUZA, G. et al. Retrofitting de uma mesa xy. v. 501778, 2015. Disponível em: <<http://swge.inf.br/SBAI2015/anais/554.pdf>>.
- SANTOS, A. R. dos; SILVA, B. W. X. da; NETO, F. S.; LOPES, L. D.; DIONÍSIO, T. H. Elaboração de túnel de vento para aplicações de ensaios aerodinâmicos. p. 39, 2014. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjO5pzx7_nuAhV_HLkGHT9GCXkQFjAAegQIAhAD&url=https%3A%2F%2Fsjc.ifsp.edu.br%2Fbiblioteca%2Findex.php%2Fcomponent%2Fphocadownload%2Fcategory%2F5-mecanica%3Fdownload%3D4%3Aelaboracao-de-tunel-de-vento-para-aplicacoes-de-ensaios-aerodinamicos&usg=AOvVaw2RnEW_mEs0Z9K7xVBjPVyZ>.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO PRINCIPAL PARA O CONTROLE DA MESA CARTESIANA

```
1 #include "Arduino.h"
2 #include "StDriver/src/StDriver.h"
3 #define MODO_PASSO_X 1
4 #define PINO_ENABLE_X 30
5 #define PINO_RESET_X 40
6 #define PINO_SLEEP_X 50
7 #define PINO_M0_X 60
8 #define PINO_M1_X 70
9 #define PINO_M2_X 80
10 #define PINO_PASSO_X 200
11 #define PINO_DIRECAO_X 200
12 #define PINO_IN1_X 0
13 #define PINO_IN2_X 0
14 #define PINO_IN3_X 0
15 #define PINO_IN4_X 0
16 #define PINO_CURSOMAXIMO_X 3
17 #define PINO_CURSOMINIMO_X 4
18 #define ESTADO_FIM_DE_CURSO_X LOW
19 #define MILIMETROS_POR_VOLTA_X 8
20 #define LIMITE_MAXIMO_X 10
21 #define SIG_PERIODO_MAXIMO_X 600
22 #define SIG_PERIODO_MINIMO_X 100
23 #define SIG_DECLIVIDADE_X 0.1
24 #define MODO_PASSO_Y 1
25 #define PINO_ENABLE_Y 15
26 #define PINO_RESET_Y 16
27 #define PINO_SLEEP_Y 17
28 #define PINO_M0_Y 18
29 #define PINO_M1_Y 19
30 #define PINO_M2_Y 20
31 #define PINO_PASSO_Y 34
32 #define PINO_DIRECAO_Y 44
33 #define PINO_IN1_Y 0
34 #define PINO_IN2_Y 0
35 #define PINO_IN3_Y 0
36 #define PINO_IN4_Y 0
37 #define PINO_CURSOMAXIMO_Y 8
```

```

38 #define PINO_CURSOMINIMO_Y 9
39 #define ESTADO_FIM_DE_CURSO_Y LOW
40 #define MILIMETROS_POR_VOLTA_Y 8
41 #define LIMITE_MAXIMO_Y 10
42 #define SIG_PERIODO_MAXIMO_Y 600
43 #define SIG_PERIODO_MINIMO_Y 100
44 #define SIG_DECLIVIDADE_Y 0.1
45 String leitura;
46 int x = 0, y = 0;
47 byte vetorPassos [8] = {9, 1, 3, 2, 6, 4, 12, 8};
48 Pino *pinoI3, *pinoEnableX, *pinoResetX, *pinoSleepX,
49 *pinoM0X, *pinoM1X, *pinoM2X,*pinoPassoX, *pinoDirecaoX,
50 *pinoIN1X, *pinoIN2X, *pinoIN3X, *pinoIN4X,*cursoMaximoX, *cursoMinimoX;
51 Sigmoidal *sigmoidalX;
52 Driver *driverX;
53 Eixo *eixoX;
54 Pino *pinoEnableY, *pinoResetY, *pinoSleepY,
55 *pinoM0Y, *pinoM1Y, *pinoM2Y,*pinoPassoY, *pinoDirecaoY,
56 *pinoIN1Y, *pinoIN2Y, *pinoIN3Y, *pinoIN4Y,
57 *cursoMaximoY, *cursoMinimoY;
58 Sigmoidal *sigmoidalY;
59 Driver *driverY;
60 Eixo *eixoY;
61 void inicializarEixos(Driver::TipoAcionamento tp);
62 void interpretarComandos(String comando);
63 void movimentarMesa(String coordenada);
64 void escolherModoPasso(Eixo *e, String modoPasso);
65 void setup(){
66     Serial.begin(9600);
67     pinoI3 = new Pino(Pino::DIGITAL, 13, OUTPUT, LOW);
68     inicializarEixos(Driver::SOFTWARE);
69     delay(3000);
70 }
71 void loop(){
72
73 }
74 void serialEvent(){
75     if(Serial.available() > 0){
76         leitura = Serial.readStringUntil('\n');

```

```

77     if(! leitura.equals("")){
78         interpretarComandos(leitura);
79         leitura = "";
80     }
81 }
82 }
83 void inicializarEixos(Driver::TipoAcionamento tp){
84     pinoEnableX = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_ENABLE_X, OUTPUT, LOW);
85     pinoResetX  = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_RESET_X, OUTPUT, LOW);
86     pinoSleepX  = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_SLEEP_X, OUTPUT, LOW);
87     pinoM0X     = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_M0_X, OUTPUT, LOW);
88     pinoM1X     = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_M1_X, OUTPUT, LOW);
89     pinoM2X     = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_M2_X, OUTPUT, LOW);
90     cursoMaximoX = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_CURSOMAXIMO_X, INPUT, HIGH)
91         ;
92     cursoMinimoX = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_CURSOMINIMO_X, INPUT, HIGH)
93         ;
94     sigmoidalX   = new Sigmoidal(SIG_PERIODO_MAXIMO_X, SIG_PERIODO_MINIMO_X
95         , SIG_DECLIVIDADE_X);
96     pinoEnableY  = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_ENABLE_Y, OUTPUT, LOW);
97     pinoResetY   = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_RESET_Y, OUTPUT, LOW);
98     pinoSleepY   = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_SLEEP_Y, OUTPUT, LOW);
99     pinoM0Y      = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_M0_Y, OUTPUT, LOW);
100    pinoM1Y      = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_M1_Y, OUTPUT, LOW);
101    pinoM2Y      = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_M2_Y, OUTPUT, LOW);
102    cursoMaximoY = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_CURSOMAXIMO_Y, INPUT, HIGH)
103        ;
104    cursoMinimoY = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_CURSOMINIMO_Y, INPUT, HIGH)
105        ;
106    sigmoidalY   = new Sigmoidal(SIG_PERIODO_MAXIMO_Y, SIG_PERIODO_MINIMO_Y
107        , SIG_DECLIVIDADE_Y);
108    if(tp == Driver::HARDWARE){
109        pinoPassoX   = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_PASSO_X, OUTPUT, LOW);
110        pinoDirecaoX = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_DIRECAO_X, OUTPUT, LOW);
111        pinoPassoY   = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_PASSO_Y, OUTPUT, LOW);
112        pinoDirecaoY = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_DIRECAO_Y, OUTPUT, LOW);
113        driverX = new Driver(pinoEnableX, pinoResetX, pinoSleepX, pinoM0X,
114            pinoM1X, pinoM2X, pinoPassoX, pinoDirecaoX);

```

```

108     driverY = new Driver(pinoEnableY, pinoResetY, pinoSleepY, pinoM0Y,
    pinoM1Y, pinoM2Y, pinoPassoY, pinoDirecaoY);
109 } else {
110     pinoIN1X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN1_X, OUTPUT, LOW);
111     pinoIN2X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN2_X, OUTPUT, LOW);
112     pinoIN3X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN3_X, OUTPUT, LOW);
113     pinoIN4X = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN4_X, OUTPUT, LOW);
114     pinoIN1Y = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN1_Y, OUTPUT, LOW);
115     pinoIN2Y = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN2_Y, OUTPUT, LOW);
116     pinoIN3Y = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN3_Y, OUTPUT, LOW);
117     pinoIN4Y = new Pino(Pino::DIGITAL, PINO_IN4_Y, OUTPUT, LOW);
118     driverX = new Driver(Driver::WAVESTEP, pinoEnableX, pinoResetX,
    pinoSleepX, pinoM0X, pinoM1X, pinoM2X, pinoIN1X, pinoIN2X, pinoIN3X,
    pinoIN4X, vetorPassos);
119     driverY = new Driver(Driver::WAVESTEP, pinoEnableY, pinoResetY,
    pinoSleepY, pinoM0Y, pinoM1Y, pinoM2Y, pinoIN1Y, pinoIN2Y, pinoIN3Y,
    pinoIN4Y, vetorPassos);
120 }
121 eixoX = new Eixo(driverX, MILIMETROS_POR_VOLTA_X, ESTADO_FIM_DE_CURSO_X
    , cursoMaximoX, cursoMinimoX, sigmoidalX);
122 eixoY = new Eixo(driverY, MILIMETROS_POR_VOLTA_Y, ESTADO_FIM_DE_CURSO_Y
    , cursoMaximoY, cursoMinimoY, sigmoidalY);
123 }
124 void interpretarComandos(String comando){
125     comando.toUpperCase();
126     if (comando.indexOf("MOVER") > -1) movimentarMesa(comando.substring(
        comando.indexOf(" ") + 1));
127     if (comando.indexOf("L") > -1) pino13->setEstado(HIGH);
128     if (comando.indexOf("D") > -1) pino13->setEstado(LOW);
129     if (comando.indexOf("MODOPASSOX") > -1) escolherModoPasso(eixoX,
        comando.substring(comando.indexOf(" ") + 1));
130     if (comando.indexOf("MODOPASSOY") > -1) escolherModoPasso(eixoY,
        comando.substring(comando.indexOf(" ") + 1));
131 }
132 void movimentarMesa(String coordenada){
133     if (!(coordenada.indexOf(",") == -1)){
134         x = coordenada.substring(0, coordenada.indexOf(",")).toDouble();
135         y = coordenada.substring(coordenada.indexOf(",") + 1).toDouble();
136         if (x >= 0 && x <= 10 && y >= 0 && y <= 10){

```

```

137     if(x != eixoX->getPosicao()) {
138         eixoX->rotacionarPara(x);
139         Serial.println(eixoX->getPosicao());
140     }
141     if(y != eixoY->getPosicao()) {
142         eixoY->rotacionarPara(y);
143         Serial.println(eixoY->getPosicao());
144     }
145 }
146 }
147 }
148 void escolherModoPasso(Eixo *e, String modoPasso){
149     switch(modoPasso.toInt()){
150         case 1: e->getDriver()->setarModoPasso( 1,0);break;
151         case 2: e->getDriver()->setarModoPasso( 2,4);break;
152         case 4: e->getDriver()->setarModoPasso( 4,2);break;
153         case 8: e->getDriver()->setarModoPasso( 8,6);break;
154     }
155 }

```

Código-fonte 1 – Código principal para o controle da mesa cartesiana.

APÊNDICE B – CÓDIGO DA CLASSE EIXO PARA O CONTROLE DO EIXO

```
1 #ifndef EIXO_H_INCLUDED
2 #define EIXO_H_INCLUDED
3 class Eixo {
4     public:
5         ~Eixo(void){}
6         Eixo(Driver *driver , Pino *pinoCursoMaximo , Pino *pinoCursoMinimo ,
7             Sigmoidal *sigmoidal){
8             this->driver = driver;
9             this->pinoCursoMaximo = pinoCursoMaximo;
10            this->pinoCursoMinimo = pinoCursoMinimo;
11            this->sigmoidal = sigmoidal;
12        }
13        Eixo(Driver *driver , byte milímetrosPorVolta , bool estadoFimDeCurso ,
14            Pino *pinoCursoMaximo , Pino *pinoCursoMinimo , Sigmoidal *sigmoidal){
15            this->driver = driver;
16            this->micrometrosPorVolta = milímetrosPorVolta * 1000;
17            this->estadoFimDeCurso = estadoFimDeCurso;
18            this->pinoCursoMaximo = pinoCursoMaximo;
19            this->pinoCursoMinimo = pinoCursoMinimo;
20            this->sigmoidal = sigmoidal;
21        }
22        void setPosicao(double p){
23            this->posicao = p;
24        }
25        Driver* getDriver(void) const {
26            return this->driver;
27        }
28        Pino* getPinoCursoMaximo(void) const {
29            return this->pinoCursoMaximo;
30        }
31        Pino* getPinoCursoMinimo(void) const {
32            return this->pinoCursoMinimo;
33        }
34        bool getEstadoFimDeCurso(void) const {
35            return this->estadoFimDeCurso;
36        }
37        double getPosicao(void) const {
```

```

36     return this->posicao;
37 }
38 Sigmoidal* getSigmoidal(void) const {
39     return this->sigmoidal;
40 }
41 void rotacionarPara(int coordenada){
42     this->rotacionarPasso(
43         (coordenada*1000 - this->posicao) > 0? Driver::HORARIO: Driver::
44         ANTIHORARIO,
45         (fabs(coordenada*1000 - this->posicao) * this->driver->
46         getPassosPorVolta()) / this->micrometrosPorVolta
47     );
48 }
49 void calibrar(){
50     this->driver->setDirecao(Driver::ANTIHORARIO);
51     this->posicao = 0;
52     while(this->pinoCursoMinimo->getEstado()){
53         this->driver->passo();
54         delayMicroseconds(this->sigmoidal->getPeriodoMaximo());
55     }
56 }
57 private:
58     Driver *driver;
59     Pino *pinoCursoMaximo, *pinoCursoMinimo;
60     Sigmoidal *sigmoidal;
61     int posicao { 0 };
62     int micrometrosPorVolta { 8000 };
63     bool estadoFimDeCurso { LOW };
64     unsigned long previousMillis { 0 };
65     bool podeMovimentar(void) const {
66         return ( this->estadoFimDeCurso && ((this->driver->getDirecao() &&
67         !this->pinoCursoMaximo->getEstado()) || (!this->driver->getDirecao()
68         && !this->pinoCursoMinimo->getEstado())) || (!this->estadoFimDeCurso
69         && ((this->driver->getDirecao() && this->pinoCursoMaximo->getEstado()
70         ) || (!this->driver->getDirecao() && this->pinoCursoMinimo->getEstado()
71         ))));
72     }
73     void rotacionarPasso(Driver::Direcao direcao, int passos){
74         this->driver->setDirecao(direcao);

```

```

68     for(int i = 0, iSig = 0; i < passos; i++, i <= ((passos * this->
driver->getModoPasso()) / 2)? iSig++: iSig--){
69         if(this->podeMovimentar()){
70             this->driver->passo();
71             delayMicroseconds(this->sigmoidal->calculoDoInstante(iSig));
72             this->posicao += direcao * (this->micrometrosPorVolta / this->
driver->getPassosPorVolta());
73         } else {
74             i = passos;
75             delay(3000);
76             this->calibrar();
77         }
78     }
79 }
80 };
81 #endif

```

Código-fonte 2 – Código da classe eixo para o controle do eixo.

APÊNDICE C – CÓDIGO DA CLASSE DRIVER PARA O CONTROLE DO DRIVER DE POTÊNCIA.

```
1 #ifndef DRIVER_H_INCLUDED
2 #define DRIVER_H_INCLUDED
3 class Driver {
4     public:
5         enum TipoAcionamento {
6             SOFTWARE = 0,
7             HARDWARE = 1
8         };
9         enum TipoPasso {
10             WAVESTEP = 0,
11             FULLSTEP = 1,
12             HALFSTEP = 2
13         };
14         enum Direcao {
15             ANTIHORARIO = -1,
16             HORARIO = 1
17         };
18         ~Driver(void){}
19         Driver(Pino* pinoIN1, Pino* pinoIN2, Pino* pinoIN3, Pino* pinoIN4,
20             byte* vetorPassos){
21             this->setarModoPasso(1, 0);
22             this->tipoPasso = Driver::WAVESTEP;
23             this->pinoIN1 = pinoIN1;
24             this->pinoIN2 = pinoIN2;
25             this->pinoIN3 = pinoIN3;
26             this->pinoIN4 = pinoIN4;
27             this->vetorPassos = vetorPassos;
28             this->direcao = Driver::HORARIO;
29             this->tipoAcionamento = TipoAcionamento::SOFTWARE;
30         }
31         Driver(Pino *pinoEnable, Pino *pinoReset, Pino *pinoSleep, Pino *
32             pinoM0, Pino *pinoM1, Pino *pinoM2, Pino *pinoPasso, Pino *pinoDirecao
33             ){
34             this->setarModoPasso(1, 0);
35             this->pinoEnable = pinoEnable;
36             this->pinoReset = pinoReset;
```

```

34     this -> pinoSleep = pinoSleep;
35     this -> pinoM0 = pinoM0;
36     this -> pinoM1 = pinoM1;
37     this -> pinoM2 = pinoM2;
38     this -> pinoPasso = pinoPasso;
39     this -> pinoDirecao = pinoDirecao;
40     this -> tipoAcionamento = TipoAcionamento::HARDWARE;
41 }
42 Driver(TipoPasso tipoPasso , Pino* pinoEnable , Pino* pinoReset , Pino*
pinoSleep , Pino* pinoM0 , Pino* pinoM1 , Pino* pinoM2 , Pino* pinoIN1 ,
Pino* pinoIN2 , Pino* pinoIN3 , Pino* pinoIN4 , byte *vetorPassos){
43     this -> setarModoPasso(1 , 0);
44     this -> tipoPasso = tipoPasso;
45     this -> pinoEnable = pinoEnable;
46     this -> pinoReset = pinoReset;
47     this -> pinoSleep = pinoSleep;
48     this -> pinoM0 = pinoM0;
49     this -> pinoM1 = pinoM1;
50     this -> pinoM2 = pinoM2;
51     this -> pinoIN1 = pinoIN1;
52     this -> pinoIN2 = pinoIN2;
53     this -> pinoIN3 = pinoIN3;
54     this -> pinoIN4 = pinoIN4;
55     this -> direcao = Driver::HORARIO;
56     this -> vetorPassos = vetorPassos;
57     this -> tipoAcionamento = TipoAcionamento::SOFTWARE;
58 }
59 void setDirecao(Direcao d){
60     this -> direcao = d;
61     if (this -> tipoAcionamento == TipoAcionamento::HARDWARE)
62         this -> pinoDirecao -> setEstado((this -> direcao == Driver::HORARIO)?
HIGH: LOW);
63 }
64 Pino* getPinoEnable(void) const {
65     return this -> pinoEnable;
66 }
67 Pino* getPinoReset(void) const {
68     return this -> pinoReset;
69 }

```

```

70 Pino* getPinoSleep(void) const {
71     return this->pinoSleep;
72 }
73 Pino* getPinoPasso(void) const {
74     return this->pinoPasso;
75 }
76 Pino* getPinoDirecao(void) const {
77     return this->pinoDirecao;
78 }
79 Direcao getDirecao(void) {
80     if(this->tipoAcionamento == TipoAcionamento::HARDWARE)
81         this->direcao = this->pinoDirecao->getEstado()? Direcao::HORARIO:
Direcao::ANTIHORARIO;
82     return this->direcao;
83 }
84 int getModoPasso(void) const {
85     return this->modoPasso;
86 }
87 int getPassosPorVolta(void) const {
88     return this->passosPorVolta;
89 }
90 void setarModoPasso(int mp, byte b){
91     this->modoPasso = mp;
92     this->passosPorVolta = 200 * this->modoPasso;
93     this->pinoM0->setEstado((b >> 2) & 1);
94     this->pinoM1->setEstado((b >> 1) & 1);
95     this->pinoM2->setEstado((b >> 0) & 1);
96     this->passoAtual = TipoPasso::FULLSTEP? 1 :0;
97 }
98 void passo(void){
99     if(this->tipoAcionamento == TipoAcionamento::HARDWARE){
100         this->pinoPasso->setEstado(this->pinoPasso->getEstado() ?LOW:HIGH)
;
101     } else {
102         switch(this->tipoPasso){
103             case TipoPasso::WAVESTEP: this->executarPasso(2,1,7); break;
104             case TipoPasso::FULLSTEP: this->executarPasso(2,0,6); break;
105             case TipoPasso::HALFSTEP: this->executarPasso(1,0,7); break;
106         }

```

```

107     }
108 }
109 private:
110     Pino *pinoEnable , *pinoReset , *pinoSleep , *pinoM0 , *pinoM1 , *pinoM2 ,
        *pinoPasso , *pinoDirecao , *pinoIN1 , *pinoIN2 , *pinoIN3 , *pinoIN4;
111     TipoAcionamento tipoAcionamento { TipoAcionamento::SOFTWARE };
112     TipoPasso tipoPasso { TipoPasso::WAVESTEP };
113     Direcao direcao { Direcao::HORARIO };
114     int passoAtual { 0 }, modoPasso { 1 }, passosPorVolta { 200 };
115     byte *vetorPassos;
116     void setarEstados(byte b){
117         this->pinoIN1->setEstado((b >> 0) & 1);
118         this->pinoIN2->setEstado((b >> 1) & 1);
119         this->pinoIN3->setEstado((b >> 2) & 1);
120         this->pinoIN4->setEstado((b >> 3) & 1);
121     }
122     void executarPasso(int contador, int limiteInferior, int
        limiteSuperior){
123         this->setarEstados(this->vetorPassos[ this->passoAtual ]);
124         this->passoAtual = this->direcao == Direcao::HORARIO? this->
        passoAtual + contador : this->passoAtual - contador;
125         if(this->passoAtual >= limiteSuperior) this->passoAtual =
        limiteInferior;
126         if(this->passoAtual < limiteInferior) this->passoAtual =
        limiteSuperior;
127     }
128 };
129 #endif

```

Código-fonte 3 – Código da classe driver para o controle do driver de potência

APÊNDICE D – CÓDIGO DA CLASSE PINO PARA O CONTROLE DOS PINOS

```
1 #ifndef PINO_H_INCLUDED
2 #define PINO_H_INCLUDED
3 class Pino {
4     public:
5         enum TipoPino {
6             ANALOGICO = 0,
7             DIGITAL    = 1,
8         };
9         ~Pino(void) {}
10        Pino(TipoPino t, byte n, byte m, unsigned int e){
11            this->setTipo(t);
12            this->setNumero(n);
13            this->setModo(m);
14            this->setEstado(e);
15        }
16        void setModo(byte m){
17            this->modo = m;
18            pinMode( this->numero, this->modo);
19        }
20        void setEstado(unsigned int e){
21            this->estado = e;
22            this->tipo == TipoPino::DIGITAL? digitalWrite(this->numero, this->
estado): analogWrite(this->numero, this->estado);
23        }
24        TipoPino getTipo(void) const {
25            return this->tipo;
26        }
27        byte getNumero(void) const {
28            return this->numero;
29        }
30        byte getModo(void) const {
31            return this->modo;
32        }
33        unsigned int getEstado(void){
34            this->estado = this->tipo == TipoPino::DIGITAL? digitalRead(this->
numero): analogRead(this->numero);
35            return this->estado;
```



```
36     }
37 private:
38     TipoPino tipo { TipoPino::DIGITAL };
39     byte numero { 0 };
40     byte modo { OUTPUT };
41     unsigned int estado { LOW };
42     void setTipo(TipoPino t){
43         this->tipo = t;
44     }
45     void setNumero(byte n){
46         this->numero = n;
47     }
48 };
49 #endif
```

Código-fonte 4 – Código da classe Pino para o controle dos pinos.

APÊNDICE E – CÓDIGO DA CLASSE SIGMOIDAL PARA O CONTROLE DA ACELERAÇÃO DOS MOTORES

```
1 #ifndef SIGMOIDAL_H_INCLUDED
2 #define SIGMOIDAL_H_INCLUDED
3 #define E 2.71828182845904523536
4 class Sigmoidal {
5     public:
6         ~Sigmoidal(void){}
7         Sigmoidal(double pmax, double pmin, double de){
8             this->periodoMaximo = pmax;
9             this->periodoMinimo = pmin;
10            this->amplitude = this->periodoMaximo - this->periodoMinimo;
11            this->vetorAceleracao = 1;
12            this->declividade = de;
13            this->xMedio = this->calculoDoXMedio();
14        }
15        double calculoDoXMedio(void) const {
16            return ((-1)*log( this->amplitude / ((this->periodoMaximo *
17            0.99999) - this->periodoMinimo) -1)) / this->declividade;
18        }
19        void setVetorAceleracao(int va){
20            this->vetorAceleracao = va;
21        }
22        void setPeriodoMaximo(double pmax){
23            this->periodoMaximo = pmax;
24        }
25        void setPeriodoMinimo(double pmin){
26            this->periodoMinimo = pmin;
27        }
28        void setDeclividade(double de){
29            this->declividade = de;
30        }
31        double getPeriodoMaximo(void) const {
32            return this->periodoMaximo;
33        }
34        double getPeriodoMinimo(void) const {
35            return this->periodoMinimo;
36        }
37    }
```

```

36     int getVetorAceleracao(void) const {
37         return this ->vetorAceleracao;
38     }
39     double getAmplitude(void) const {
40         return this ->amplitude;
41     }
42     double getDeclividade(void) const {
43         return this ->declividade;
44     }
45     double getXMedio(void) const {
46         return this ->xMedio;
47     }
48     double calculoDoInstante(int i) const {
49         return ( this ->amplitude / ( 1 + pow( E , (this ->vetorAceleracao *
50         (this ->declividade * (i - this ->xMedio)))))) + this ->periodoMinimo;
51     }
52 private :
53     double periodoMaximo { 600 }, periodoMinimo { 100 }, amplitude { this
54     ->periodoMaximo - this ->periodoMinimo }, declividade { 0 }, xMedio { 0
55     };
56     int     vetorAceleracao { 1 };
57 };
58 #endif

```

Código-fonte 5 – Código da classe Sigmoidal para o controle da aceleração dos motores.

APÊNDICE F – CÓDIGO DO HEADER STDRIIVER PARA O INCLUDE DE CLASSES

```
1 #ifndef STEPPERDRIVER_H
2 #define STEPPERDRIVER_H
3 #include <math.h>
4 #include "Pino.h"
5 #include "Sigmoidal.h"
6 #include "Driver.h"
7 #include "Eixo.h"
8 #endif
```

Código-fonte 6 – Código do header StDriver para o include de classes.

1

2

3

4

5

6

A

A

B

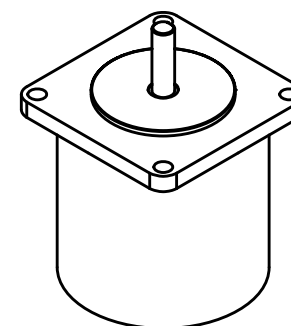
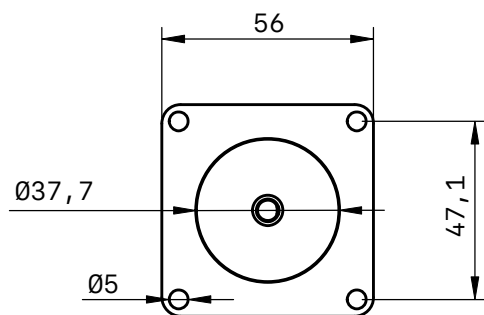
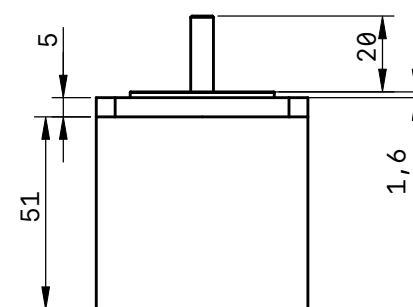
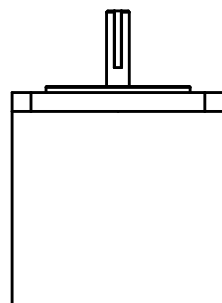
B

C

C

D

D



TÍTULO

Corpo 01

ÚLTIMA ATUALIZAÇÃO

05/03/21

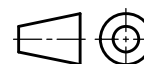
UNIDADES

mm

FOLHA

1 / 1

PROJEÇÃO DE PRIMEIRO ÂNGULO



ESCALA

1:2

TAMANHO

A4

1

2

3

4

5

6

