

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GABRIEL RODRIGUES DIAS

Análise de viabilidade de um sistema de medições de tensões
dinâmicas operacionais em um referencial rotativo

São Carlos
2024

GABRIEL RODRIGUES DIAS

Análise de viabilidade de um sistema de medições de tensões
dinâmicas operacionais em um referencial rotativo

Monografia apresentada ao Curso
de Engenharia Mecânica, da Es-
cola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Engenheiro
Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Leopoldo P.R.
de Oliveira

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos
2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R541a	<p>R. Dias, Gabriel</p> <p>Análise de viabilidade de um sistema de medições de tensões dinâmicas operacionais em um referencial rotativo / Gabriel R. Dias; orientador Leopoldo P.R. de Oliveira. São Carlos, 2023.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.</p> <p>1. Extensômetros. 2. Manutenção preditiva. 3. Indústria 4.0. 4. Fórmula SAE. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: **Gabriel Rodrigues Dias**

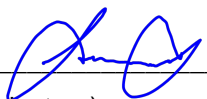
Título: **Análise de viabilidade de um sistema de medições de tensões dinâmicas operacionais em um referencial rotativo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA


Prof.Dr. Leopoldo P.R. de Oliveira
(Orientador)

Nota atribuída: 8,0 (oito e zero)


(assinatura)

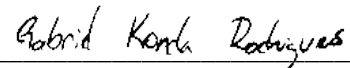
Profa.Dra. Lucana Montanari

Nota atribuída: 8,0 (oito e zero)


(assinatura)

Dr. Gabriel Konda Rodrigues

Nota atribuída: 8,0 (oito e zero)


(assinatura)

Média: 8,0 (oito e zero)

Resultado: Aprovado

Data: 19 / 12 / 2023.

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM ☒ NÃO ☐ Visto do orientador



*Este trabalho é dedicado aos meus pais que se
sacrificaram para permitir que eu esteja aqui hoje
e a todos que me cederam o ombro amigo nos
momentos mais difíceis.*

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Marise Gonçalves Rodrigues Dias e ao meu pai Elizario Lopes Dias, que sempre me incentivaram a estudar e à estar aqui hoje concluindo meu sonho de criança.

À minha falecida vó Marilda Gonçalves Rodrigues que cuidou de mim quando os meus pais não puderam estar perto e me ensinou o que é ser uma boa pessoa.

À Diana que enquanto estava viva esteve comigo em todos os momentos difíceis em que não havia mais ninguém.

À minha família que nunca foram só parentes e fizeram parte da minha formação de caráter em especial: José Rodrigues, Sônia, Ediméia Gonçalves, Lucia Helena, Leonardo Rodrigues, Fábio da Costa, Gustavo Rodrigues.

À Roberta Ortiz, minha companheira e a sua família, Dulcimar Ortiz, João Roberto da Silva e Renata Ortiz que desde de 2022 me acolheram como parte da sua família, me dando apoio em todos os momentos em que precisei.

Aos amigos que a USP me deu e fizeram parte do meu crescimento como profissional e pessoal no campus.

Aos irmãos que a vida me deu e que mesmo conversando uma vez por ano com as dificuldades da rotina nunca deixaram de morar no meu coração.

A professora Luciana Montanari que além de professora foi ouvinte e mentora na minha trajetória acadêmica e ao professor Leopoldo que me orientou na Iniciação Científica e neste presente trabalho.

“Quem não luta tá morto”
(M.M.L.J, 2023)

RESUMO

Dias, G. R. **Análise de viabilidade de um sistema de medições de tensões dinâmicas operacionais em um referencial rotativo**: subtítulo. 2023. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Com a chegada de novas tecnologias principalmente ligadas a hardwares cada vez menores com alta capacidade de processamento, evolução de softwares capazes de realizar diversas ações e a conectividade cada vez maior entre componentes com diferentes tamanhos e funcionalidades, é natural que a indústria incorpore essas novas ferramentas no dia a dia. E a representação dessa incorporação vem na forma da Indústria 4.0 ou Quarta Revolução Industrial que traz novas possibilidades de maneiras de executar e controlar um processo. Um dos elementos da Indústria 4.0 se trata da Manutenção Preditiva que consiste em prever através de medições em tempo real o momento correto da manutenção de um sistema ou componente dele. O presente trabalho visa aplicar o conceito de Indústria 4.0 e de Manutenção Preditiva para testar a viabilidade de medir dados em tempo real de um referencial rotativo para um referencial inercial usando como estudo de caso um semi-eixo utilizado em carro de Formula SAE. Para isso, será necessário uma análise estrutural do componente para se estimar a tensão teórica e para dimensionar os extensômetros. Além disso, todos os componentes devem ser testados de forma individual e para validar seu real funcionamento, e testes do conjunto de aquisição de dados serão necessários.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Fórmula SAE. Manutenção preditiva. Extensômetros.

ABSTRACT

Dias, G. R. **Viability analysis of measurements of dynamic operating stresses in a rotating reference frame**. 2023. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

With the arrival of new technologies, mainly linked to increasingly smaller hardware with high processing capacity, the evolution of software capable of carrying out various actions and the ever-increasing connectivity between components of different sizes and functionalities, it is natural for industry to incorporate these new tools into everyday life. And the representation of this incorporation comes in the form of Industry 4.0 or the Fourth Industrial Revolution, which brings new possibilities for ways of executing and controlling a process. One of the elements of Industry 4.0 is Predictive Maintenance, which consists of predicting the correct time for maintenance of a system or component through real-time measurements. This work aims to apply the concept of Industry 4.0 and Predictive Maintenance to test the viability of measuring data in real time from a rotating reference to an inertial reference, using as a case study a driveshaft used in a Formula SAE car. This will require a structural analysis of the component to estimate the theoretical stress and to size the strain gauges. In addition, all the components must be tested individually to validate their actual functioning, and tests of the data acquisition set will be necessary.

Keywords: Industry 4.0. Formula SAE. Predictive Maintenance. strain gauges.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Linha do tempo das Revoluções Industriais	21
Figura 2 – Competição Fórmula SAE	23
Figura 3 – Esquema do circuito utilizado	25
Figura 4 – Desenho semi-eixo	26
Figura 5 – Montagem dos sensores baseado na Ponte de Wheatstone	27
Figura 6 – CAD suporte motor e motor transmissão	29
Figura 7 – CAD Suporte montado com motor e motor transmissão	29
Figura 8 – CAD Bancada de testes	29
Figura 9 – CAD Carcaça para acomodar hardware de transmissão de dados	30
Figura 10 – CAD bancada de testes completa	31
Figura 11 – Montagem da balança	34
Figura 12 – Instalação e calibração dos sensores	35
Figura 13 – Gráfico da diferença entre massa real e massa medida	35
Figura 14 – Gráfico do comportamento do erro	36
Figura 15 – Teste estático para recepção de dados	36
Figura 16 – Configuração do conjunto de transmissão e recepção dos dados	37
Figura 17 – Teste de bancada no torno	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IoT	Internet of Things
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USP	Universidade de São Paulo
CNC	Computer Numerical Control
SAE	Society of Automotive Engineers
LED	Light Emitting Diode
CAD	Computer-Aided Design
AWS	Amazon Web Service

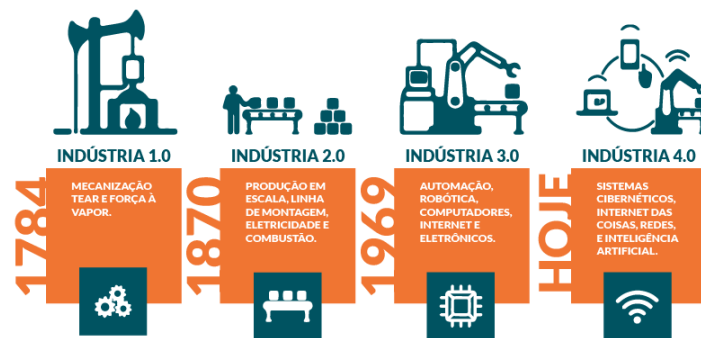
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivo	22
1.2	Estrutura do texto	22
2	MATERIAIS E MÉTODOS	25
2.1	Materiais	25
2.2	Métodos	25
2.2.1	Análise preliminar para escolha do hardware	26
2.2.1.1	Método analítico para o sinal de saída do semi eixo	26
2.2.2	Montagem da bancada para o teste estático	28
2.2.2.1	Montagem da bancada	28
2.2.2.2	Teste para se obter a curva de Torque do motor	30
2.2.2.3	Teste de bancada do circuito completo	30
3	RESULTADOS	33
3.1	Resultados referentes à análise do semi-eixo	33
3.1.1	Resultado encontrado para o semi-eixo	33
3.1.2	Escolha de componentes	33
3.2	Testes dos Componentes do circuito	33
3.2.1	Montagem final da balança	33
3.2.2	Testes do <i>Strain Gauge</i>	34
3.2.3	Teste da transmissão do sinal estático	34
3.2.4	Teste da transmissão do sinal em rotação	34
4	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Desde o século XVIII, os avanços tecnológicos e o desenvolvimento industrial tem andado lado a lado, seja com as máquinas à vapor com a Primeira Revolução Industrial, seja com o começo do uso da robótica com a Terceira Revolução Industrial. Nos dias de hoje, com novas tecnologias cada vez mais em uso, como inteligência artificial, conexões cada vez maiores e estáveis com a internet, a indústria naturalmente incorpora essas novas tecnologias que vem promovendo novas mudanças no chão de fábrica, surgindo o conceito de Indústria 4.0 ou também chamada de Quarta Revolução Industrial, termo utilizado na Alemanha pela primeira vez em 2011, durante a Feira de Hannover (SEBRAE, 2022). A Figura 1 representa um histórico das revoluções industriais e suas principais características:

Figura 1 – Linha do tempo das Revoluções Industriais



Fonte: Citisystems

A Indústria 4.0 é um conceito que engloba elementos de automação e outras tecnologias como IoT, computação em nuvem, inteligência artificial (INDÚSTRIA, 2022). Aplicando esses conceitos em um ambiente industrial, com foco em aumento de eficiência da produção (RAPOSO, 2021). Além de benefícios na parte de Manutenção Preditiva que diminui tempo de ociosidade de máquinas e aumenta a produção.

Uma das bases da Indústria 4.0 está na utilização da Internet das Coisas que surge com possibilidade de ter diversos aparelhos que se comportam como computadores completos e não tendo tamanho ou função primordial como restrições, aliado com as conexões cada vez mais rápidas e eficientes de banda larga que permitem construir uma rede de comunicações e comandos que possibilitam o controle e o monitoramento a distância. Nesse cenário que surge o conceito da Internet das Coisa (IoT). O IoT, em suma, se refere à rede entre dispositivos cotidianos e a nuvem ou entre os próprios dispositivos (AWS, 2022).

Com essa nova realidade em mãos, é possível com poucos cliques, que um torno CNC seja acionado de forma remota, ou que receba um comando para desligar a máquina ao sinal de algum mal funcionamento, detectado por sensores com também sistemas embarcados. Dessa forma, diminui-se a necessidade, por exemplo, da quantidade de

operadores responsáveis por analisar as máquinas e diminuindo o fator humano em falhas nesse sentido.

Um dos impactos que o IoT e outras ferramentas da Indústria 4.0 possibilitam, é no método de manutenção. A manutenção de máquinas e equipamentos no geral é de suma importância para garantir a vida útil do seu equipamento além do seu bom funcionamento e há algumas formas de se proceder com a manutenção. Existe a manutenção corretiva, que se trata da manutenção que se tem quando sua máquina falha, como por exemplo, quando o carro para na pista e precisa ser rebocado até uma oficina para ser consertado. Existe também a manutenção preventiva, que se dá de forma antes de uma falha acontecer mas não necessariamente significa que algum componente irá falhar naquele momento, como os casos de revisões anuais dos automóveis.

Por último, tem-se a manutenção preditiva, que utiliza do acompanhamento e análise contínua para calcular momento futuro e predizer o melhor momento para a manutenção (PIOVESAN, 2022). Esse tipo de manutenção é possibilitado com o uso de sensores remotos que monitoram comportamentos como vibração e utilizam dos benefícios do IoT para a interface comunicação e pode em alguns casos utilizar de *machining learning* para auxiliar na interpretação dos dados e posterior decisão de manutenção.

Outro ponto importante para este estudo se trata da competição Fórmula SAE Brasil. Se trata de um evento universitário anual o qual reúne universidades de todo o país na cidade de Piracicaba-SP. O evento tem o intuito de testar as competências técnicas individuais e coletivas dos estudantes através do desafio de projetar e manufatura um carro estilo fórmula que será avaliado quanto ao projeto e ao desempenho em pista em provas que variam desde apresentações de projeto à provas que testam o desempenho do carro em uma pista (BRASIL, 2022). Para o presente trabalho a equipe para o qual será realizada os estudos será a equipe EESC-USP Tupã, equipe de Fórmula SAE Elétrica do campus da USP São Carlos. Na Figura 2 é possível observar uma imagem ilustrativa do evento no qual está sendo realizado uma das provas que compõe a competição.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho visa analisar a viabilidade de uma estrutura capaz de analisar dados em tempo real de um componente de um carro de Fórmula SAE da equipe EESC-USP Tupã utilizando as bases da Indústria 4.0 como os conceitos de IoT e Manutenção preditiva. Com essa análise será possível que a equipe possa fazer aquisição de dados e possa, medir os esforços para validar dados de projeto.

1.2 Estrutura do texto

Este trabalho está organizado nos seguintes tópicos:

Figura 2 – Competição Fórmula SAE



Fonte: SAE Brasil

- **Materias e Métodos:** onde serão apresentados as metodologias e os materiais utilizados no trabalho;
- **Resultados:** onde serão apresentados os resultados das análises e testes realizados;
- **Conclusão:** onde serão apresentadas as considerações finais a cerca do trabalho.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

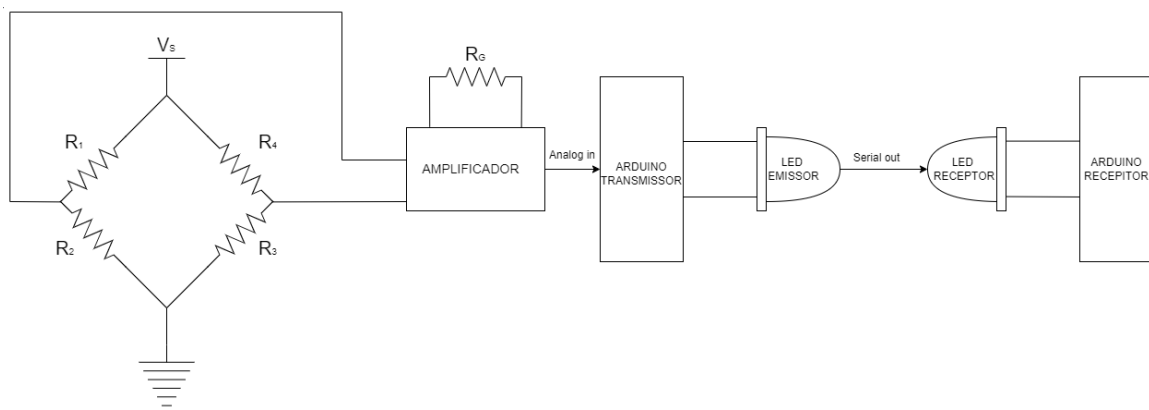
2.1 Materiais

Os componentes de hardware e alguns dos *softwares* passaram por testes individuais para testar sua funcionalidade da seguinte forma:

- *Softwares* de aquisição de dados: através da criação de um sistema de balança;
- *Strain Gauge* e Amplificador: através de um teste estático onde foi aplicado um torque conhecido para averiguar porcentagens de erro;
- LED's: foram realizados dois testes quanto a qualidade de transmissão de dados via led, um estático e outro com os LED's girando

O esquema final do circuito de aquisição, transmissão de dados pode ser observado na Figura 3. Para a medição da tensão foi utilizado dois extensômetros espinha de peixe diametralmente posicionados de forma a captar as tensões torcionais além de um amplificador H7X11 para melhorar a qualidade do sinal. Para o circuito de aquisição foi utilizado um arduino e para a transmissão de sinal foram utilizados LED's infravermelhos posicionados de forma paralela, e para receber o sinal foi utilizado um receptor de LED infravermelho que transmitia esse sinal para um outro arduino.

Figura 3 – Esquema do circuito utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 Métodos

Nesta seção será exposta a metodologia utilizada na realização do trabalho.

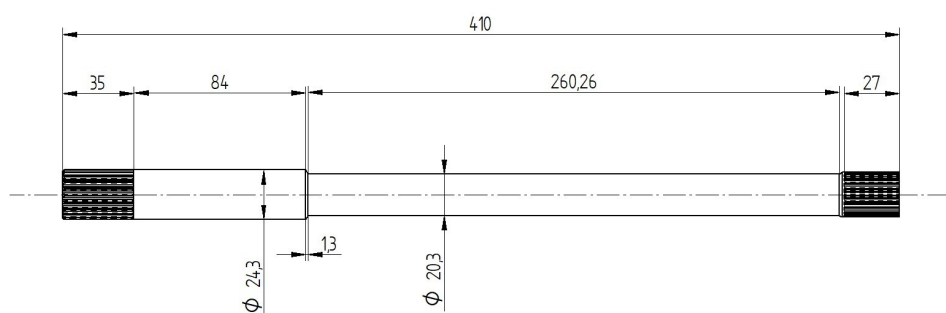
2.2.1 Análise preliminar para escolha do hardware

Neste tópico será apresentado a metodologia utilizada para encontrar a faixa de voltagem que os extensômetros geraram com o esforço do sofrido pelo semi-eixo e a origem dos esforços com os testes do carro em pista. Com esse resultado é possível dimensionar os componentes que serão utilizados para captar e transmitir o sinal.

2.2.1.1 Método analítico para o sinal de saída do semi eixo

Analisa-se primeiramente o posicionamento do semi-eixo, depois como estão configurados os seus apoios e origem dos esforços. Como ele é preso por uma junta fixa em uma extremidade e uma junta móvel na outra, ele não sofre esforços axiais. Já os esforços torcionais são transmitidos pelas juntas e tem origem do torque do motor e da reação das rodas. Dessa forma, basta-se calcular a tensão de cisalhamento no local de interesse da peça. Esse aspecto também é importante para a escolha dos extensômetros a serem utilizados, uma vez que com apenas a tensão de cisalhamento atuando, é possível realizar uma montagem com conjuntos de extensômetros espinhas de peixe em uma configuração que favorece a análise da tensão de cisalhamento (HOFFMANN, 1989). Na Figura 4 pode-se observar a geometria do semi-eixo a ser estudado, se trata de um semi-eixo comercial de um Onix 1.0 2014 cuja as medidas foram tiradas através de um paquímetro e a partir delas pode-se esboçar o CAD a seguir.

Figura 4 – Desenho semi-eixo



Fonte: Elaborado pelo autor

Como observado na Figura 4, existe duas seções de diâmetro constante no eixo que por consequência possui uma tensão de cisalhamento constante. Por conta dessa uniformidade, foi decidido que os esforços a serem estudados seriam para seção de diâmetro menor, além de ter uma tensão de cisalhamento maior.

Por fim, para calcularmos o esforço submetido utiliza-se da teoria da mecânica dos sólidos para determinarmos de forma analítica o esforço. A equação usada será:

$$\tau = \frac{T * c}{J} \quad (2.1)$$

Onde:

- τ : tensão de cisalhamento;
- c : raio do semi-eixo;
- J : momento polar de inércia da seção transversal.

Com a tensão atuante, e conhecendo a geometria do material, calcula-se a deformação que o semi-eixo estará sujeito e por consequência tem-se o sinal de saída gerado. Com o sinal é possível dimensionar o *hardware* de sensoriamento necessário para a continuação do projeto.

Utilizando a teoria da mecânica dos sólidos dos materiais, temos que a deformação se dá por:

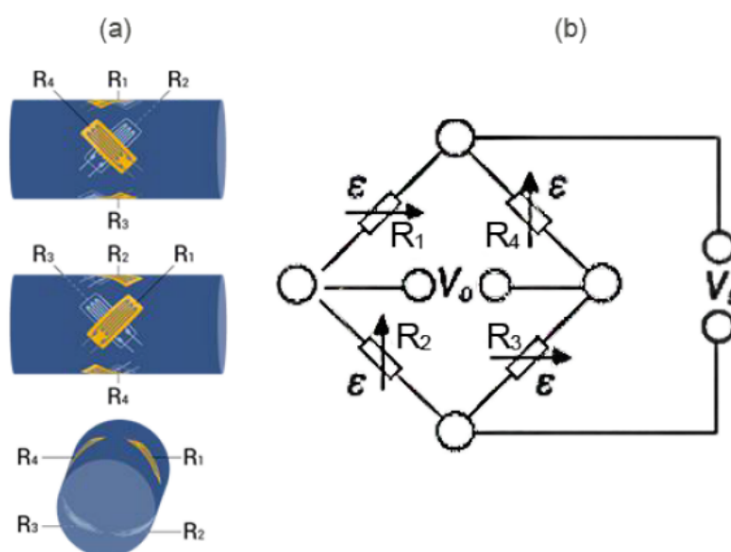
$$\varepsilon = \frac{\tau}{G} \quad (2.2)$$

Onde:

- ε : é a deformação;
- G : módulo de elasticidade transversal do material;

Na Figura 5 pode-se observar o esquema a ser utilizado no posicionamento dos sensores que se utiliza extensômetros posicionados de modo a pegar os esforços torcionais que o semi-eixo sofre:

Figura 5 – Montagem dos sensores baseado na Ponte de Wheatstone



Fonte: Raposo, 2018

Tanto para o cálculo do sinal de saída, quanto para o posicionamento dos sensores, utiliza-se da teoria proposta por Sir Charles Wheatstone, em 1843, da Ponte de Wheatstone com as propriedades dos piezoresistores (HOFFMANN, 1989) e chega-se na seguinte relação:

$$\frac{V_o}{V} = \frac{K * \varepsilon}{4} \quad (2.3)$$

Onde:

- V_o : tensão de saída;
- V : tensão de alimentação;
- K : constante do material, normalmente usado $K = 2$.

A partir dos resultados, será possível fazer a escolha de componentes de sensoriamento possa ser escolhido de forma que ofereça uma leitura com menor ruído possível.

2.2.2 Montagem da bancada para o teste estático

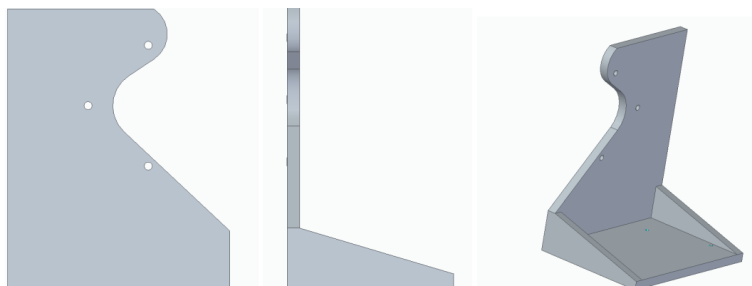
Antes da realização dos testes em pista é necessário validar o modelo em um teste em bancada, em que será necessário tirar a curva de comportamento do motor para analisar melhor o torque que ele pode fornecer através de um torquímetro e posteriormente o teste com o semi-eixo em si . Neste tópico será exposto a concepção da montagem da bancada e os testes necessários para o cumprimento desta etapa.

2.2.2.1 Montagem da bancada

Pensando que deve ser realizado um teste para avaliar o motor utilizando um torquímetro para depois realizar a análise da peça, é necessário que a bancada possa se adaptar para cada teste. Com isso, para os suportes dos motores, foi projetado para que tivesse uma geometria que em um primeiro momento fosse suporte apenas do motor mas que pudesse ser suporte do conjunto motor transmissão. Suporte pode ser observado na Figura 6 e na Figura 7 pode ser observado como funciona a montagem tanto do motor quanto do conjunto motor transmissão na carcaça.

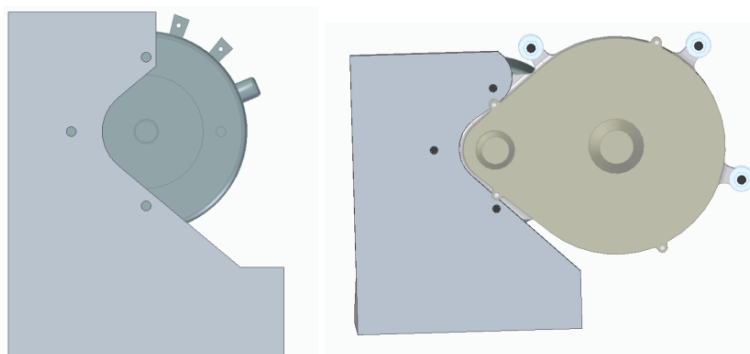
Os suportes serão fixados em perfis de alumínio, conforme Figura 8 fornecidos pela empresa Engelegho. A opção por esses perfis se dá pelo seu uso permitir que os suportes possam ser montados em distâncias diferentes possibilitando usar a mesma base tanto no teste para adquirir a curva de torque do motor quanto para o teste com o circuito de aquisição completo depois. Com isso, a configuração final da bancada segue o seguinte modelo:

Figura 6 – CAD suporte motor e motor transmissão



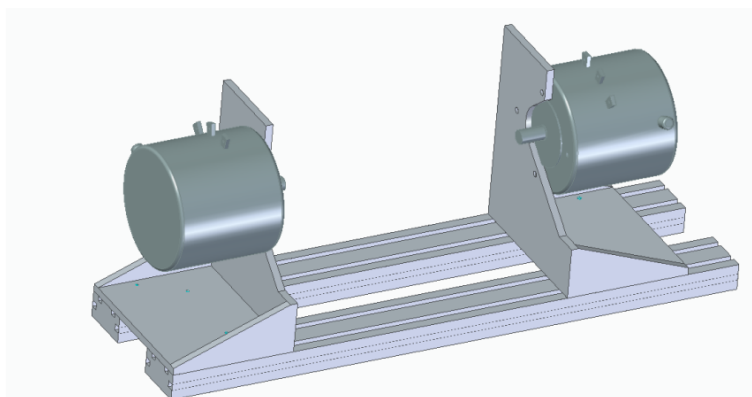
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 – CAD Suporte montado com motor e motor transmissão



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 8 – CAD Bancada de testes



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.2.2 Teste para se obter a curva de Torque do motor

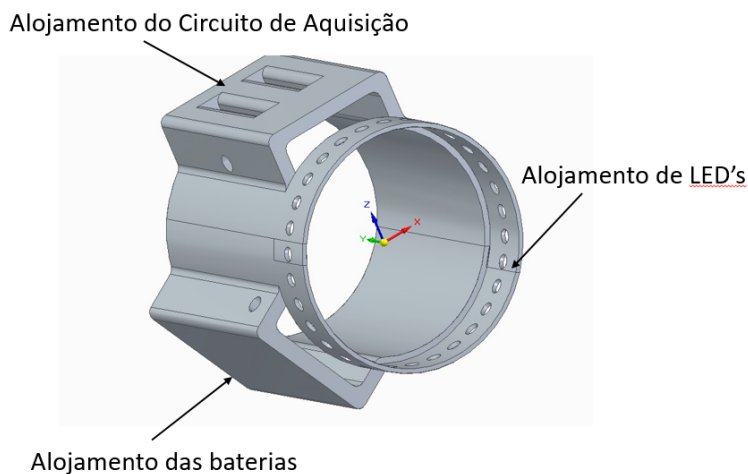
Como não há um teste prévio, a equipe extracurricular não dispõe das informações reais do motor, e por isso é necessário antes da realização do teste com o semi-eixo, a realização de um que possa levantar a curva de desempenho do motor. Para isso, utilizando o fato do carro possuir um motor para cada roda, um dos motores será o motor a ser analisado e o outro motor será o motor de carga e entre eles será colocado um torquímetro para analisar o torque que ele está entregando de acordo com sua rotação.

2.2.2.3 Teste de bancada do circuito completo

Neste teste, o intuito é analisar em um sistema controlado, o desempenho do circuito montado em um ambiente e dados de entrada controlados para se avaliar se ao ser colocado em pista, a montagem fornecerá resultados confiáveis. Para isso, se montará as respectivas transmissões nos motores e o conjunto será montado na bancada e entre elas será colocada o semi-eixo instrumentado, e se fornecerá ao motor torques conhecidos e posteriormente comparar os resultados obtidos pelo circuito embarcado com o torque aplicado real, a fim de se avaliar a confiabilidade do sistema.

Para esse teste foi impresso em 3D uma carcaça que acomode o arduino responsável pela aquisição dos dados, a bateria para alimentá-lo e acomodar os LED's necessários para a transmissão de dados. O CAD da carcaça pode ser observada na Figura 9. Este projeto também foi aproveitado para os testes feitos no torno para testar a transmissão dos dados será visto posteriormente. Foram colocados 30 LED's receptores, para fazer a transmissão de dados, esse número foi determinado para que pudesse ter o maior número de LED's no diâmetro determinado.

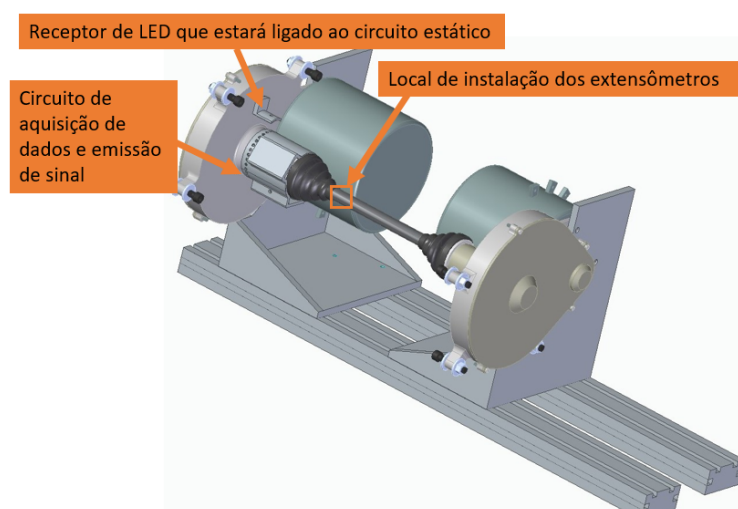
Figura 9 – CAD Carcaça para acomodar hardware de transmissão de dados



Fonte: Elaborado pelo autor

O esquema da bancada completa de testes pode ser observada na Figura 10. Na imagem pode-se ver a conexão entre os dois pares de motor transmissão, é necessário utilizar desta disposição por conta da necessidade de igualar o torque de saída entre os motores. Pode-se observar também o local de disposição dos extensômetros e a a disposição das carcaças para alojamento dos LED's e circuitos de aquisição de dados, também pode-se observar o alojamento para o receptor de dados estático, que ficará fixado na carcaça de forma alinhada com o anél de LED.

Figura 10 – CAD bancada de testes completa



Fonte: Elaborado pelo autor

3 RESULTADOS

3.1 Resultados referentes à análise do semi-eixo

Neste tópico serão discutidos os resultados encontrados ao analisar de forma analítica e a consequência escolha de componentes a serem utilizados.

3.1.1 Resultado encontrado para o semi-eixo

Aplicando-se os valores nominais do eixo estudado na Equação (1), utilizando um torque de 22 N.m em conjunto com uma relação de transmissão de 7,11 tem-se como resultado uma tensão de $\tau = 47,62 MPa$. Considerando que o material em questão é um aço SAE 4140, com $G = 80 GPa$, tem-se uma deformação estimada, de acordo, com a Equação (2), de $\varepsilon = 5,875 \times 10^{-4}$. Com essa deformação e considerando uma alimentação $V = 5V$ e $k = 2$, pela Equação (3) temos um sinal de saída de $V_o = 1,469 m.V$.

3.1.2 Escolha de componentes

Considerando que o arduino divide 5 V em 1024, a escala de resolução fica em torno de 4,9 mV, assim para melhorar a leitura dos dados por um conversor ADC embutido no Arduino. O escolhido foi o amplificador INA128 da marca Texas Instruments (TEXAS INSTRUMENTS, 2018). Para os extensômetros, um conjunto de espinha de peixe se torna adequado por conta da predominância de tensões de cisalhamento nos esforços do semi-eixo.

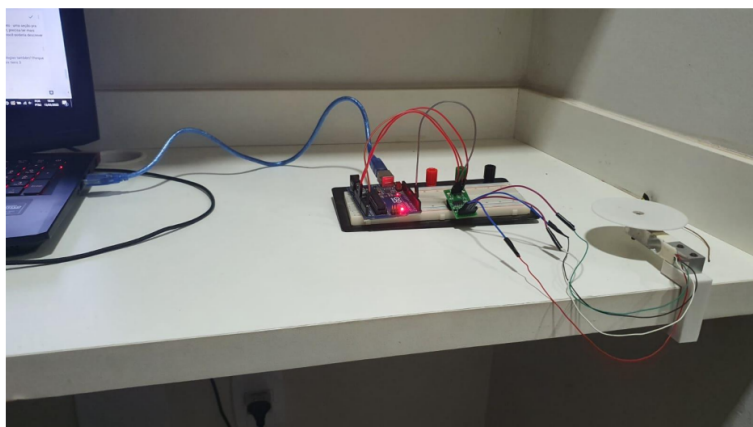
3.2 Testes dos Componentes do circuito

À seguir serão apresentados os resultados dos testes referentes aos componentes que compõem o sistema de aquisição e transmissão de dados acoplados ao semi-eixo.

3.2.1 Montagem final da balança

Com o objetivo de testar a capacidade do software de aquisição de dados do arduino em ler e entregar dados preciso, foi criado um sistema de balança para se medir carga conforme observado na Figura 10. Foi utilizado um arduino Uno para a aquisição de dados. O sensor utilizado foi uma célula de carga de até 5 kg que foi acoplada a duas peças impressas em 3D: a primeira se trata de um suporte que acopla a mesa de testes de modo a prender a fixar a estrutura e não criar torques secundários que possam atrapalhar a leitura; a segunda se trata de uma tara de suporte para colocar os pesos conhecidos. Foi utilizado um amplificador HX711 da empresa *SparkFun*, que tem uso específico para extensômetros (SPARKFUN, 2022), para melhorar a banda de sinal da célula de carga. O sistema foi conectado diretamente a um computador para ler o sinal e o resultado pode ser observado na Figura 10:

Figura 11 – Montagem da balança



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Testes do *Strain Gauge*

Com o objetivo de testar a eficiência dos extensômetros, foram instalados no semi-eixo quatro espinhas de peixe de forma que distem 90 graus entre eles opostas com o objetivo de ler as tensões torcionais que iriam ser aplicadas. O semi-eixo foi preso em uma morsa para fixar-lo e poder aplicar as cargas conhecidas. As cargas conhecidas foram aplicadas utilizando um sargento como braço de alavanca e pesos conhecidos foram sendo adicionados e o resultado da carga foi sendo observado no monitor serial e anotados. A estrutura do teste pode ser observada na Figura 11.

Durante as medições obteve-se bons resultados, com erro na média de 1,1%. Na Figura 12 que a diferença de medições se manteve pequena durante toda a amostra de pesos, com uma tendência de esbalização mesmo para massas maiores e na Figura 13 evidencia essa tendência de estabilização, que mesmo nos piores casos o erro não chegou a 2% e tendeu a estabilizar na casa dos 1,5%.

3.2.3 Teste da transmissão do sinal estático

Com o objetivo de testar a eficiência do sinal de LED, foi realizado em um primeiro momento um teste estático, conforme a Figura 14. Para esse teste foi utilizado da manufatura aditiva para a criação de um alojamento de LED's que foram soldados em paralelo, com o objetivo de testar a eficiência do sinal de LED ao serem soldados e se haveria perda com o uso do alojamento impresso em 3D. Para recepção de sinal foi utilizado de um LED receptor infravermelho.

3.2.4 Teste da transmissão do sinal em rotação

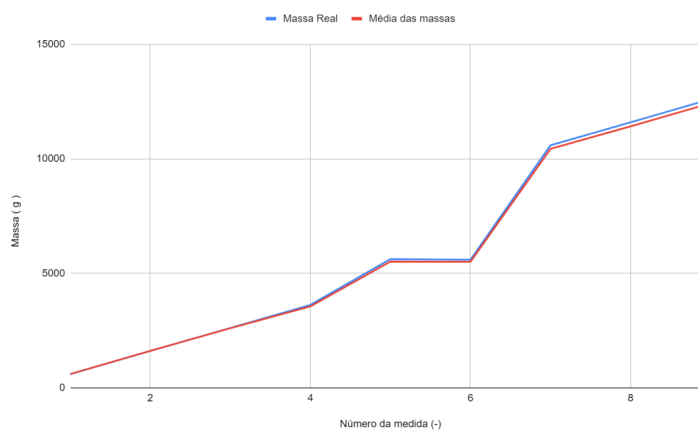
Também é necessário realizar um teste para analisar a qualidade de recepção do sinal enquanto o conjunto do semi-eixo se encontra girando. Para isso, o semi-eixo foi acoplado

Figura 12 – Instalação e calibração dos sensores



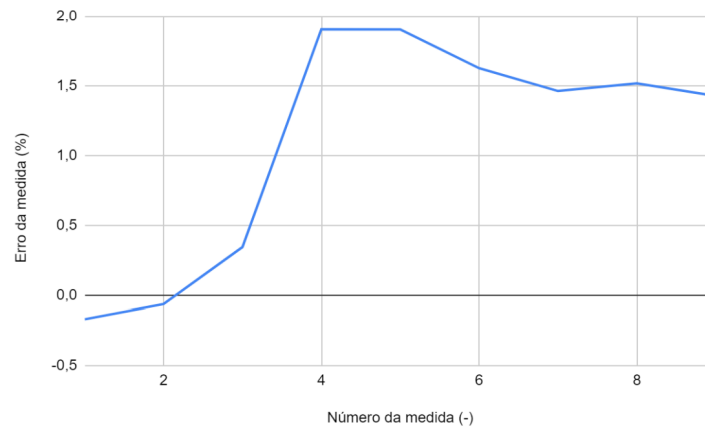
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 – Gráfico da diferença entre massa real e massa medida



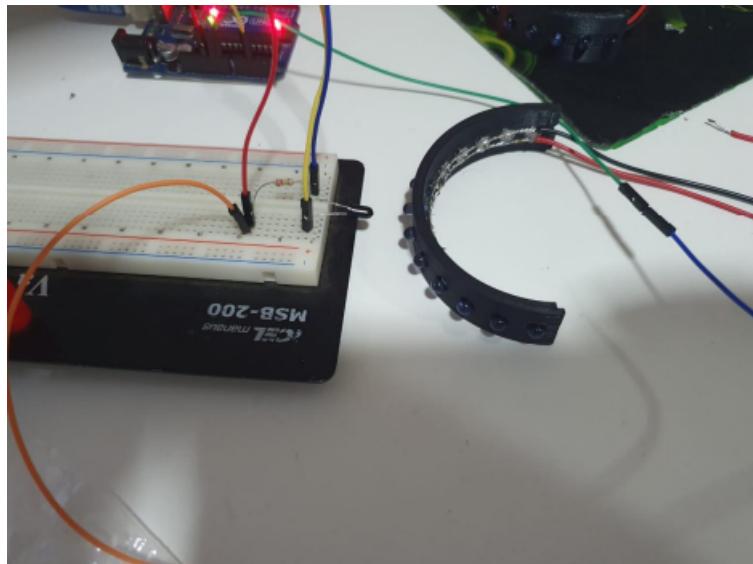
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14 – Gráfico do comportamento do erro



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Teste estático para recepção de dados

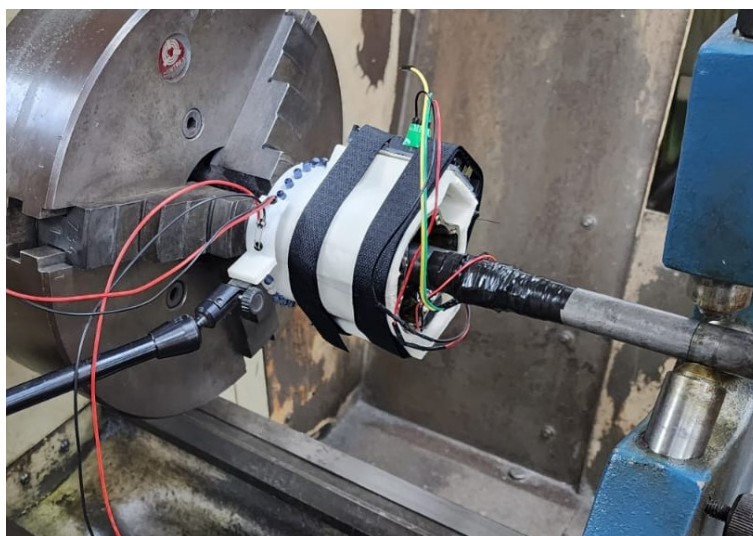


Fonte: Elaborado pelo autor

em um torno para que ele fosse rotacionado e pudesse ser testado se o sistema iria captar bem os sinais a serem transmitidos enquanto o sistema estivesse em rotação.

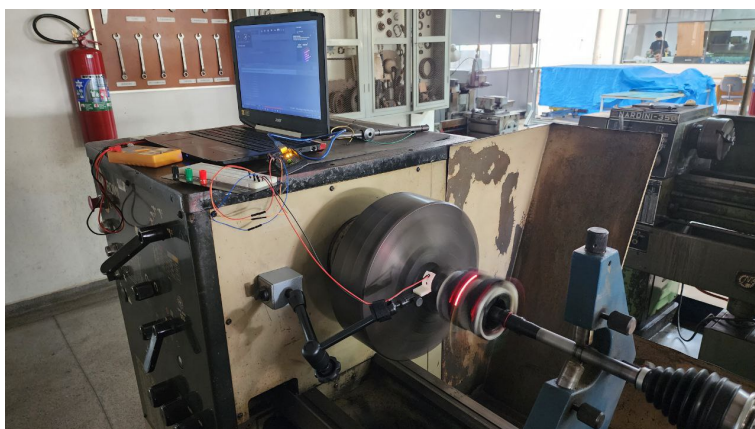
Para esse teste os resultados apresentaram um resultado satisfatório no qual a recepção de sinal se manteve estável em todas as velocidades de rotação do torno. O eixo foi colocado para girar em 4 velocidades de rotação diferentes: 71 rpm, 112 rpm, 180 rpm, 280 rpm. Em todas elas a recepção de sinal não se alterou sendo necessário apenas um led receptor de sinal para receber o sinal. Para os LED's emissores foram utilizados 30 emissores igualmente espaçados acoplados na carcaça impressa, conforme pode ser observado na Figura 15, em que também pode ser observado o posicionamento dos receptores do sinal. Os receptores de sinal foram posicionados de forma alinhada com os emissores e ao longo do teste foi testado grau de desalinhamento que ainda garantiria a recepção de sinal. Imagens do teste podem ser observados na Figura 16 no qual se encontra o conjunto de aquisição e transmissão dos dados rotacionando e o conjunto de recepção dos dados estáticos.

Figura 16 – Configuração do conjunto de transmissão e recepção dos dados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 – Teste de bancada no torno



Fonte: Elaborado pelo autor

4 CONCLUSÃO

O objetivo deste presente trabalho foi de propor e analisar a viabilidade do uso de sensoriamento sem fio em elementos rotativos para medir tensões e usar desses dados em validações e manutenção preditiva, escolhendo como estudo de caso um semi-eixo de um carro de Fórmula SAE. Quanto a isso o objetivo foi sucedido. Os elementos que compõem todo o sistema de aquisição, transmissão de dados foi testado e validado, e se mostrou viável, principalmente com o uso de LED's infravermelho que são pouco usados para essa aplicação.

Por conta do cronograma, a empresa que ficou responsável pela realização dos testes para levantar a curva do motor e análise das tensões com o semi-eixo instrumentado no teste de bancada não conseguiu realizar a tempo da entrega do trabalho.

Visando trabalhos futuros há alguns pontos que podem encurtar caminhos. Para os alojamentos de LED's, optar por estruturas de paredes finas, para não atrapalhar a qualidade do sinal. Para sistemas de arrefecimento para testes de bancada, utilizar de soluções comerciais já existentes como freezers ao invés de procurar ideias personalizadas. Por último, como o teste final com os receptores de LED não foram realizados, não é possível saber a precisão exata de leitura, como para esse tipo de testes a janela é curta, aconselha-se a também possuir um receptor de sinal infravermelho mais robusto para o caso de o receptor simples não for capaz de fazer as leituras corretas.

REFERÊNCIAS

AWS. *O que é IoT (Internet das Coisas)?* [s.n.], 2022. Disponível em: [https://aws.amazon.com/pt/what-is/iot/#:~:text=o%20AWS%20IoT-,O%20que%20Ã%20a%20Internet%20das%20Coisas%20\(IoT\)%3F,como%20entre%20os%20prÃ%20prios%20dispositivos](https://aws.amazon.com/pt/what-is/iot/#:~:text=o%20AWS%20IoT-,O%20que%20Ã%20a%20Internet%20das%20Coisas%20(IoT)%3F,como%20entre%20os%20prÃ%20prios%20dispositivos). Acesso em: 11 novembro 2023.

BRASIL, S. *SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS*. [s.n.], 2022. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil/>. Acesso em: 09 novembro 2023.

HOFFMANN, K. *An introductionn to measurements using strain gauges*. [S.l.]: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

INDUSTRIA, P. da. *INDUSTRIA 4.0: ENTENDA SEUS CONCEITOS E FUNDAMENTOS*. [s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/>. Acesso em: 09 novembro 2023.

M.M.L.J. *Quem não Luta tá morto*. TRACTIAN, 2023. Disponível em: <https://www.instagram.com/ocupamaui.official/reels/>. Acesso em: 06 dezembro 2023.

PIOVESAN, P. *Manutenção Preditiva: o que é, vantagens e prática [2022]*. TRACTIAN, 2022. Disponível em: <https://traction.com/blog/manutencao-preditiva>. Acesso em: 13 novembro 2023.

RAPOSO, A. *Medição de esforços dinâmicos em eixo-árvore via sensores sem fio*. 2021.

SEBRAE. *Quando surgiu a Indústria 4.0?: Conheça as ferramentas digitais da indústria 4.0 que podem otimizar seus resultados e oferecer um diferencial competitivo no mercado*. [s.n.], 2022. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/quando-surgiu-a-industria-40,4542c009cbce3810VgnVCM100000d701210aRCRD#:~:text=O%20termo%20IndÃ%20stria%204.0%20foi,estudo%20sobre%20a%20IndÃ%20stria%204.0>. Acesso em: 13 novembro 2023.

SPARKFUN. *LOAD CELL AMPLIFIER HX711 BREAKOUT HOOKUP GUIDE*. [s.n.], 2022. Mensagem recebida por <mtmendes@uol.com.br> em 26 nov. 2003. Disponível em: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide>. Acesso em: 09 novembro 2023.

ANEXO

Programa utilizado na balança:

Circuito usado na balança:

```
#include "HX711.h"
#define calibration_factor 423000 //This value is obtained using the
SparkFun_HX711_Calibration sketch
#define DOUT 3
#define CLK 2
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 2 , 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);
HX711 scale;
int i;
float media = 0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 scale demo");
  lcd.begin(16,2);
  lcd.clear();
  scale.begin(DOUT, CLK);
  scale.set_scale(calibration_factor);
  scale.tare();
  Serial.println("Readings:");
}
void loop() {
  Serial.print("Reading: ");
  // Serial.print(scale.get_units(), 3);
  //scale.get_units() returns a float
  //Serial.print(scale.read_average(20));
  //Serial.print(scale.get_units(), 3);
  for (int i = 0; i < 21; i++) {
    media = media + scale.get_units();
  }
  Serial.print(media/20, 3);
  Serial.print(" kg");
  calibration_factor
  //lcd.print("koe");
  lcd.print(media/20);
```

```

15
lcd.clear();
Serial.println();
media = 0;
}

```

Programa utilizado para teste do strain-gauge:

```

#include "HX711.h"
#define DOUT 7
#define CLK 6
HX711 scale;
float calibration_factor = 30250;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 calibration sketch");
  Serial.println("Remove all weight from scale");
  Serial.println
  Serial.println("Press + or a to increase calibration factor");
  Serial.println("Press - or z to decrease calibration factor");
  scale.begin(DOUT, CLK);
  scale.set_scale();
  scale.tare();
  long zero_factor = scale.read_average();
  Serial.print("Zero factor: ");
  Serial.println(zero_factor);
}
void loop() {
  scale.set_scale(calibration_factor);
  Serial.print("Reading: ");
  Serial.print(scale.get_units(), 3);
  Serial.print(" kg");
  units like a sane person
  Serial.print(" calibration_factor: ");
  Serial.print(calibration_factor);
  Serial.println();
  if(Serial.available())

```

```
{
char temp = Serial.read();
if(temp == '+' || temp == 'a')
calibration_factor += 10;
else if(temp == '-' || temp == 'z')
calibration_factor -= 10;
}
}
```

Programa utilizado para mandar o sinal:

```
void setup() {
  Serial.begin(19200);
}

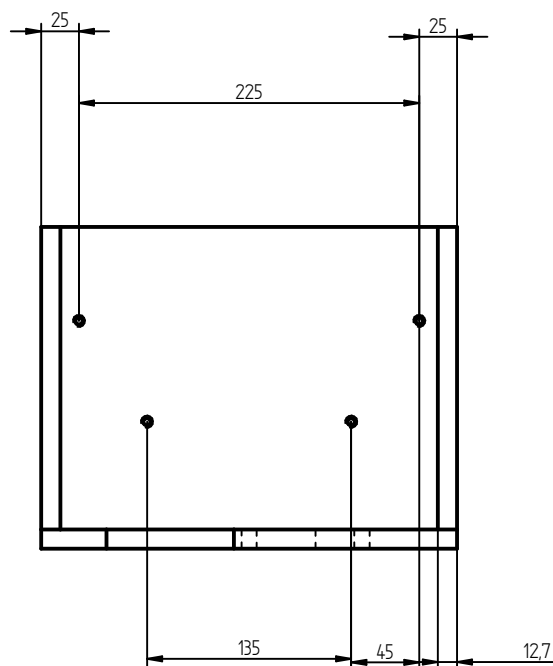
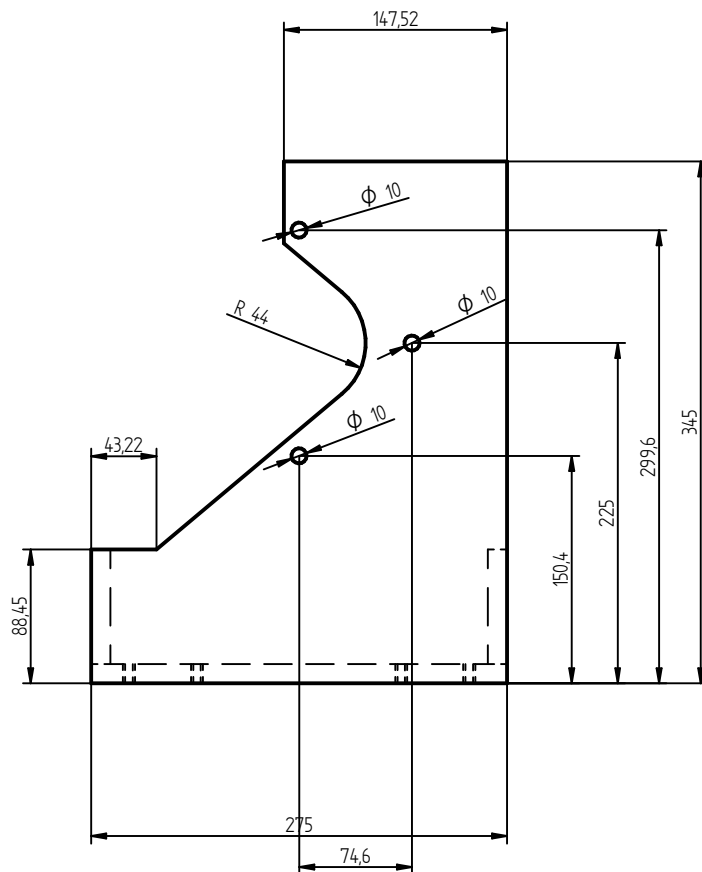
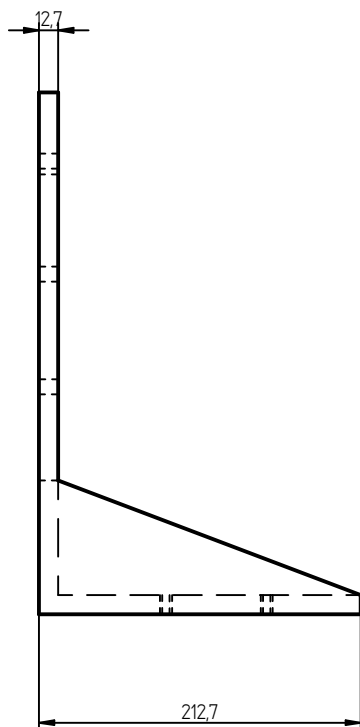
void loop() {
  Serial.println(analogRead(A0));
  delay(5);
}
```

Programa para testar a recepção de dados:

```
const int pinoFototransistor = A2; //PINO ANALÓGICO UTILIZADO PELO
FOTOTRANSISTOR

void setup() {
  Serial.begin(9600); //INICIALIZAÇÃO DA SERIAL
  pinMode(pinoFototransistor, INPUT); //DEFINE O PINO COMO ENTRADA
}

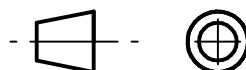
void loop() {
  if (analogRead(pinoFototransistor) < 800) { //SE A LEITURA DO PINO
FOR MENOR QUE 800 BITS, FAZ
    Serial.println("Recebendo sinal infravermelho"); //IMPRIME O TEXTO
  } else { //SENÃO, FAZ
    Serial.println("Sinal infravermelho interrompido");
  }
}
```



Título:
Suporte Motor

Autor: Gabriel Rodrigues Dias

Material: Aço SAE 1020



Escala:

Data: 29 / 11 / 2023



EESC • USP