



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE

Anderson Vinícius de Oliveira Rosa

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO REMOTO PARA MEDIÇÃO DE
TORQUE EM EIXOS ROTATIVOS**

Joinville, Santa Catarina – Brasil
2022

Anderson Vinícius de Oliveira Rosa

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO REMOTO PARA MEDAÇÃO DE
TORQUE EM EIXOS ROTATIVOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharias da Mobilidade da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Andrea Piga Carboni, Dr.

Coorientador: Marcos Alves Rabelo, Dr.

Joinville, Santa Catarina – Brasil
2022

Catalogação na fonte pela Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina.

Anderson Vinícius de Oliveira Rosa

Desenvolvimento de um dispositivo remoto para medição de torque em eixos rotativos / Anderson Vinícius de Oliveira Rosa; Orientador, Andrea Piga Carboni, Dr.; Coorientador, Marcos Alves Rabelo, Dr. - Joinville, Santa Catarina - Brasil, 17 de março de 2022.

102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, CTJ - Centro Tecnológico de Joinville, Departamento de Engenharias da Mobilidade.

Inclui referências

1. Palavra-Chave 1, 2. Palavra-Chave 2, 3. Palavra-Chave 3, I. Andrea Piga Carboni, Dr. II. Marcos Alves Rabelo, Dr. III. Departamento de Engenharias da Mobilidade IV. Desenvolvimento de um dispositivo remoto para medição de torque em eixos rotativos

Anderson Vinícius de Oliveira Rosa

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO REMOTO PARA MEDIÇÃO DE
TORQUE EM EIXOS ROTATIVOS**

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado(a) para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva, e foi aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharias da Mobilidade do CTJ – Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, Santa Catarina – Brasil, 17 de março de 2022.

Leonardo Moreto Elias, Dr.
Coordenador de TCC da Engenharia
Automotiva

Banca Examinadora:

Andrea Piga Carboni, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa
Catarina – UFSC

Antônio Otaviano Dourado, Dr.
Universidade Federal de Santa
Catarina – UFSC

Sérgio Junichi Idehara, Dr.
Universidade Federal de Santa
Catarina – UFSC

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados à Gerald Weber, Miguel Frasson, Leslie H. Watter, Bruno Parente Lima, Flávio de Vasconcellos Corrêa, Otavio Real Salvador, Renato Machnievscz¹ e todos aqueles que contribuíram para que a produção de trabalhos acadêmicos conforme as normas ABNT com L^AT_EX fosse possível.

Agradecimentos especiais são direcionados ao Centro de Pesquisa em Arquitetura da Informação² da Universidade de Brasília (CPAI), ao grupo de usuários *latex-br*³ e aos novos voluntários do grupo *abnT_EX2*⁴ que contribuíram e que ainda contribuirão para a evolução do abnT_EX2.

¹ Os nomes dos integrantes do primeiro projeto abnT_EX foram extraídos de <http://codigolivre.org.br/projects/abntex/>

² <http://www.cpai.unb.br/>

³ <http://groups.google.com/group/latex-br>

⁴ <http://groups.google.com/group/abntex2> e <http://abntex2.googlecode.com/>

RESUMO

TBD

Palavras-chaves: Palavra-Chave 1. Palavra-Chave 2. Palavra-Chave 3.

ABSTRACT

TBD

Keywords: Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Princípio de funcionamento de um transdutor de torque	16
Figura 2	- Extensômetro	16
Figura 3	- Forças internas atuando em um corpo em equilíbrio	19
Figura 4	- Corpo de prova de ensaio de tração	20
Figura 5	- Exemplo de diagrama tensão-deformação	21
Figura 6	- Deformação de uma barra sob carga de tração	22
Figura 7	- Representação do efeito da deformação em uma viga sob flexão	22
Figura 8	- Deformação e distribuição de tensão em uma sob flexão	23
Figura 9	- Viga retangular sob flexão	24
Figura 10	- Extensômetro fixado á um corpo de prova	25
Figura 11	- Ponte de Wheatstone	26
Figura 12	- Princípio de funcionamento de um amplificador de sinal	28
Figura 13	- Ilustração de ruídos presentes em sinais analógicos e digitais . .	28
Figura 14	- Representação gráfica de um sinal analógico em forma digital .	29
Figura 15	- Diagrama de blocos dos estágios de um sistema de medição . .	30
Figura 16	- Controlador ESP32	31
Figura 17	- Conversor analógico digital ADS1115	32
Figura 18	- Etapas da metodologia PRODIP	34
Figura 19	- Etapas do projeto informacional	36
Figura 20	- Etapas do projeto conceitual	37
Figura 21	- Utilização de um transdutor de torque	38
Figura 22	- Datalogger DMI TCR 44es	39
Figura 23	- Dispositivo Bridge101A	40
Figura 24	- Projeto inicial do dispositivo	42
Figura 25	- Matriz de listagem de atributos	45
Figura 26	- Matriz QFD	46
Figura 27	- Conceito de funcionamento inicial	48
Figura 28	- Matriz morfológica	50
Figura 29	- Matriz de avaliação	51
Figura 30	- Soluções escolhidas	52
Figura 31	- Protótipo preparado para a realização dos experimentos	53
Figura 32	- Segundo protótipo preparado para a realização dos experimentos	54
Figura 33	- Dispositivo de ensaio de flexão	55
Figura 34	- Sistema de medição utilizado por (MINELA, 2017)	56
Figura 35	- Sistema de de medição utilizando o LINX ADS2002	57
Figura 36	- Protótipo do dispositivo desenvolvido conectado com o extenso- metro no dispositivo de flexão	58
Figura 37	- Aplicação do 'peso 3' no dispositivo de flexão	60

Figura 38 – Modelagem da montagem do dispositivo	61
Figura 39 – Desenho em vistas padrões (primeiro diedro)	62
Figura 40 – Projeto elétrico do dispositivo	63
Figura 41 – Esquema da programação do dispositivo	64
Figura 42 – Objeto NetworkDevice	65
Figura 43 – Interface gráfica	69
Figura 44 – Sinal obtido pela aplicação da carga de 0,138kg no dispositivo . .	71
Figura 45 – Sinal obtido pela aplicação da carga de 1,04kg no dispositivo . .	71
Figura 46 – Sinal obtido da aplicação de 0,138 kg de carga aplicada no dispositivo	73
Figura 47 – Sinal obtido da aplicação da massa ded 0,163 kg de carga aplicada no dispositivo	73
Figura 48 – Sinal obtido da aplicação de 1,040 kg de carga aplicada no dispositivo	74
Figura 49 – Sinal obtido da aplicação da massa ded 0,163 kg de carga aplicada no dispositivo	75
Figura 50 – Sinal obtido da aplicação de 0,138 kg de carga aplicada no dispositivo	97
Figura 51 – Sinal obtido da aplicação de 0,250 kg de carga aplicada no dispositivo	98
Figura 52 – Sinal obtido da aplicação de 0,337 kg de carga aplicada no dispositivo	98
Figura 53 – Sinal obtido da aplicação de 0,549 kg de carga aplicada no dispositivo	99
Figura 54 – Sinal obtido da aplicação de 0,636 kg de carga aplicada no dispositivo	99
Figura 55 – Sinal obtido da aplicação de 0,748 kg de carga aplicada no dispositivo	100
Figura 56 – Sinal obtido da aplicação de 0,834 kg de carga aplicada no dispositivo	100
Figura 57 – Sinal obtido da aplicação de 1,040 kg de carga aplicada no dispositivo	101
Figura 58 – Sinal obtido da aplicação de 1,135 kg de carga aplicada no dispositivo	101
Figura 59 – Sinal obtido da aplicação de 1,250 kg de carga aplicada no dispositivo	102
Figura 60 – Sinal obtido da aplicação de 1,330 kg de carga aplicada no dispositivo	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Comparação entre dispositivos encontrados	41
Tabela 2	-	Resultado pesquisa de mercado	44
Tabela 3	-	Prioridade dos requisitos definidos pela matriz QFD	47
Tabela 4	-	Levantamento de componentes	49
Tabela 6	-	Valores de massas utilizadas para aplicação das cargas nos dispositivos de flexão e torção	59
Tabela 7	-	Cargas aplicadas para os experimentos	72
Tabela 8	-	Cargas aplicadas para os experimentos	75

LISTA DE CÓDIGOS

Código 1	– Controller Program	64
Código 2	– NetworkDevice	65
Código 3	– Network Device calibrate offset	66
Código 4	– Network Device calibrate offset	67

LISTA DE SÍMBOLOS

F_i	Forças resultantes aplicadas no corpo no eixo i
M_i	Momentos aplicados no corpo no eixo i
ε	Deformação presente no material
l	Comprimento do corpo após deformação
l_0	Comprimento do corpo sem deformação
σ	Tensão interna do material
E	Módulo de elasticidade do material
δ	Variação de comprimento de uma barra sob tração
P	Carga aplicada no corpo
A	Área da seção transversal
L	Comprimento da barra
M	Momentos fletor na viga
I	Momento de inércia da seção transversal
y	Distância entre limite e o centróide da área da seção transversal
L	Distância entre força aplicada e a força em uma viga em flexão
b	Largura da seção transversal da viga em flexão
t	Espessura da seção transversal da viga em flexão
k	Fator de sensibilidade do extensômetro
R_s	Resistência nominal do extensômetro
ΔR	Variação de resistência no extensômetro causada pela deformação
V_{out}	Tensão de saída da ponte de wheatstone
V_{out}	Tensão de excitação da ponte de wheatstone
R_i	Resistência nominal dos resistores da ponte de wheatstone
ε_i	Valor de deformação no extensômetro i
$Gain(A)$	Grau de amplificação do amplificador de sinal

<i>input</i>	Sinal de entrada
<i>output</i>	Sinal amplificado
\bar{x}	Valor médio das amostras
x_i	Valor nominal da amostra i
n	Quantidade de amostras
Dp	Desvio Padrão
χ^2	Valor de chi quadrado
$observed_i$	Valor experimental observado da amostra i
$expected_i$	Valor experimental esperado da amostra i
$f(D)$	Função de calibração
D	Valor obtido do sinal em bits
fa	Fator de calibração a
fb	Fator de calibração b
NV_{high}	Valor nominal da carga maior
NV_{low}	Valor nominal da carga menor
D_{high}	Valor obtido do sinal pela aplicação da carga maior
D_{low}	Valor obtido do sinal pela aplicação da carga menor
VE	Valor de engenharia
RM	Resistência média do extensômetro
RC	Resistência de calibração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	SOLICITAÇÕES E RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	18
2.1.1	Deformação e limites do material	19
2.1.2	Deformação de uma viga em flexão	22
2.2	EXTENSOMETRIA	24
2.2.1	Ponte de Wheatstone	26
2.3	OBTENÇÃO DE SINAIS	27
2.4	SISTEMAS DE MEDAÇÃO	30
2.5	ANÁLISE DOS SINAIS OBTIDOS	32
2.5.1	Ambiente de desenvolvimento computacional Python	33
2.6	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE PRODUTO	34
2.6.1	Fase de planejamento	35
2.6.2	Projeto informacional	35
2.6.3	Projeto conceitual	36
2.6.4	Projeto preliminar	36
2.6.5	Projeto detalhado	37
3	DESENVOLVIMENTO	38
3.1	PLANEJAMENTO DO PROJETO	39
3.1.1	Mapeamento tecnológico	39
3.1.2	Pesquisa científica	41
3.2	PROJETO INFORMACIONAL	43
3.3	PROJETO CONCEITUAL	47
3.4	PROJETO PRELIMINAR	52
3.4.1	Protótipos avaliados	52
3.4.2	Dispositivo para ensaio de flexão	54
3.4.3	Sistemas de medição	56
3.4.4	Cargas aplicadas	58
3.5	PROJETO DETALHADO	60
4	RESULTADOS	70
4.1	SINAIS OBTIDOS	70

4.1.1	Sinais de calibração	70
4.1.2	Sinais calibrados obtidos	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
5.0.1	Trabalhos futuros sugeridos	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – MATRIZ QFD DO PROJETO	81
	APÊNDICE B – DESENHOS DO PROJETO DETALHADO DO DISPOSITIVO	83
B.1	PROJETO ELÉTRICO	83
	APÊNDICE C – ALGORITMOS DO CONTROLADOR	85
C.1	ALGORITMO UTILIZANDO O CONTROLADOR ESP8266 E O AMPLIFICADOR HX711	85
C.2	ALGORITMO UTILIZANDO O CONTROLADOR ESP32 E O AMPLIFICADOR ADS1115	86
	APÊNDICE D – ALGORITMOS DO SOFTWARE DE OBTENÇÃO DE DADOS	88
D.1	OBJETO NETWORKDEVICE	88
D.2	INTERFACE GRÁFICA	90
	APÊNDICE E – SINAIS OBTIDOS PELO PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO	97

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, pode-se observar o constante aumento da importância da otimização dos projetos de componentes em projetos de produtos na indústria automotiva, produtos altamente otimizados resultam em um menor custo de material e de fabricação dos componentes.

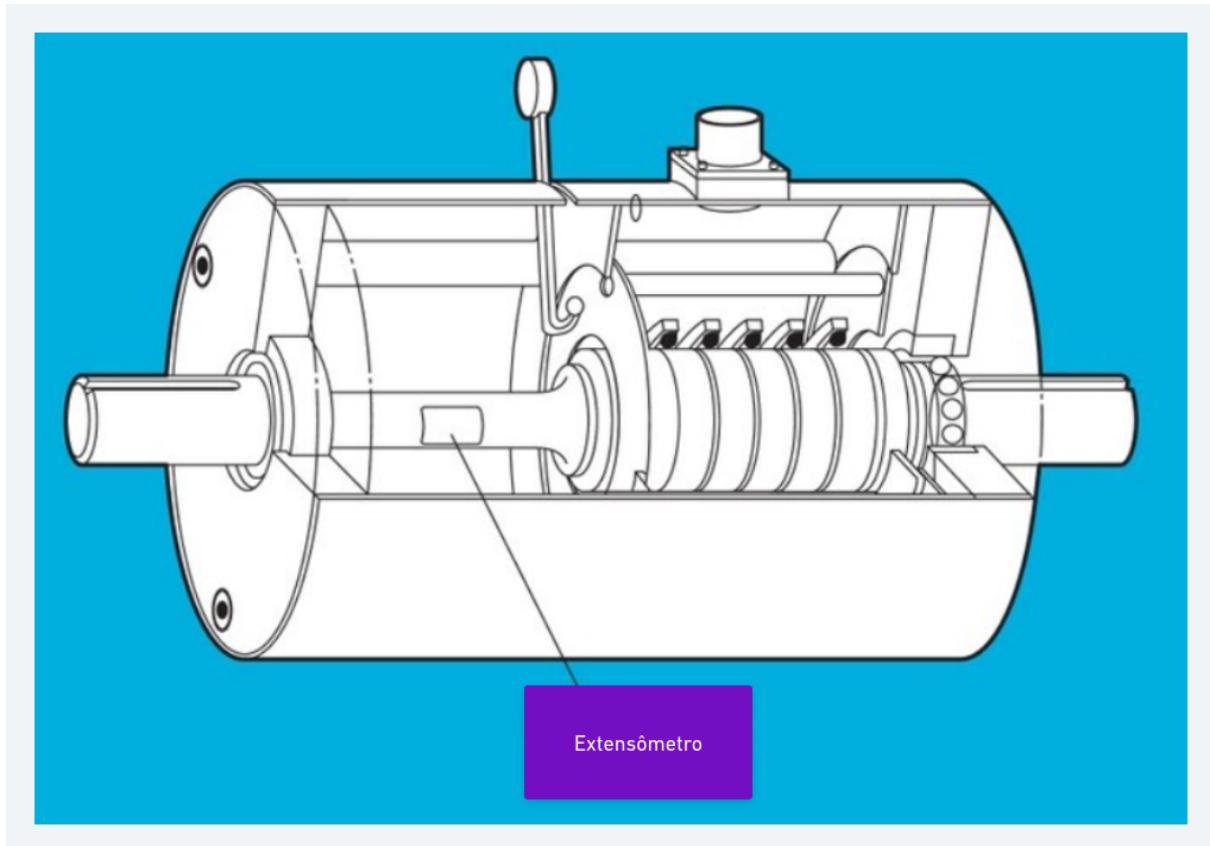
A carga presente em um componente em operação pode ser diferente que as cargas previstas no seu projeto, isso pode ocorrer devido a erros durante a fabricação ou na montagem dos componentes. Para se garantir a segurança, um componente devem ser projetado para suportar tensões admissíveis maiores do que as presentes durante a sua utilização. ([HIBBEKER, 2010](#))

Como resposta às essas incertezas envolvidas no projeto analítico de um componente os engenheiros tendem a selecionar maiores valores de fator de segurança em um projeto, o que causa o aumento de custo e de massa de um componente. Um método de evitar os altos valores de fatores de segurança é a utilização de dados de cargas que representam com mais exatidão as situações reais de cargas aplicadas em um componente.

Dados reais de utilização podem ser obtidos utilizando dispositivos de sensoramento, porém, nota-se que ainda existe uma dificuldade de obtenção de alguns tipos de dados de maneira direta em um veículo, como os dados de cargas de tração em um eixo em movimento ([NURPRASSETIO et al., 2018](#)). Um dos motivos desse problema é devido ao fato de que os equipamentos disponíveis para se Medir são usualmente para aplicações de alta precisão como os transdutores de torque, o princípio de funcionamento de um transdutor de torque é mostrado na [Figura 1](#).

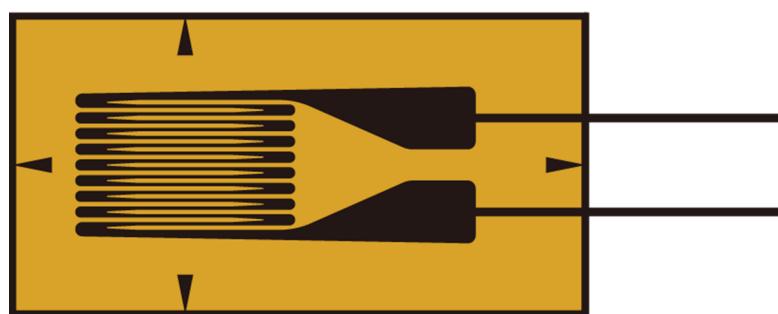
O elemento sensor em um transdutor de torque são sensores de deformação montados no eixo, esse tipo de sensor é utilizado uma vez que as deformações locais em um corpo são proporcionais às cargas presentes no corpo caso o material esteja operando em condição de deformação elástica. Um extensômetros, ilustrados na [Figura 2](#), é um elemento sensor que, quando colado á uma superfície apresenta variação de sua resistência elétrica caso ocorra a deformação local na superfície que está colado. Esses tipos de sensores apresentam uma boa disponibilidade no mercado e são amplamente utilizados em balanças e células de carga.

Figura 1 – Princípio de funcionamento de um transdutor de torque



Fonte: adaptado de ([KYOWA, 2022](#))

Figura 2 – Extensômetro



Fonte: <https://www.althensensors.com/sensors/strain-sensors-strain-gauges/high-strain-repeated-strain-gauges/4468/yfla-series-strain-gauges-for-very-high-strain/> acesso em fev 2022

O presente trabalho propõe o desenvolvimento do projeto de um dispositivo de baixo custo para obtenção de dados de torque em um eixo em movimento, de forma que os sinais obtidos pelo dispositivo sejam transmitidos utilizando tecnologias de comunicação sem fio, para eliminar a necessidade dos conectores elétricos rotativos. O desenvolvimento do projeto do dispositivo seguirá a metodologia de projeto de produto PRODIP com o objetivo de garantir replicabilidade, permitir futuras otimizações e expansões e facilitar sua implementação em um caso real.

Por fim, será montado o protótipo do dispositivo com a finalidade de validar seu princípio de funcionamento e verificar a precisão dos dados obtidos com sua utilização, que é feito seguindo a metodologia de experimentos e com a comparação dos resultados de dados de deformação obtidos por um dispositivo industrial nos estudos de caso desenvolvidos por Minela (2017).

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho são apresentados nas seções a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um dispositivo de baixo custo para obtenção de dados de torque em componentes rotativos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Identificar e desenvolver o dispositivo com foco na utilização por um público alvo

Desenvolver as documentações necessárias para garantir a replicabilidade e expansibilidade do dispositivo

Obter valores de precisão aceitáveis para utilização pelo público alvo identificado

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo apresenta os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento do princípio de funcionamento do dispositivo. São apresentados tópicos referentes a solicitações mecânicas e resistência dos materiais, princípios de sensoriamento de deformação e instrumentação de extensômetros, obtenção de sinais e transmissão de dados. Também será apresentado as principais tecnologias necessárias para o processo de desenvolvimento do dispositivo.

2.1 SOLICITAÇÕES E RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

Um entendimento introdutório sobre resistência dos materiais é necessário de modo a entender sobre os comportamentos físicos de um componente mecânico que sofre a ação de cargas externas. O ponto de partida do estudo da resistência dos materiais é o da análise do comportamento mecânico de um componente em equilíbrio.

Utilizando as equações de estática, deve-se determinar as forças e os momentos resultantes que agem no interior de um corpo, com a finalidade de verificar e garantir a integridade do mesmo durante o uso (HIBBELER, 2010). Um corpo em equilíbrio, deve satisfazer a [Equação \(1\)](#) e [Equação \(2\)](#), que descrevem o balanço estático conforme a segunda lei de Newton.

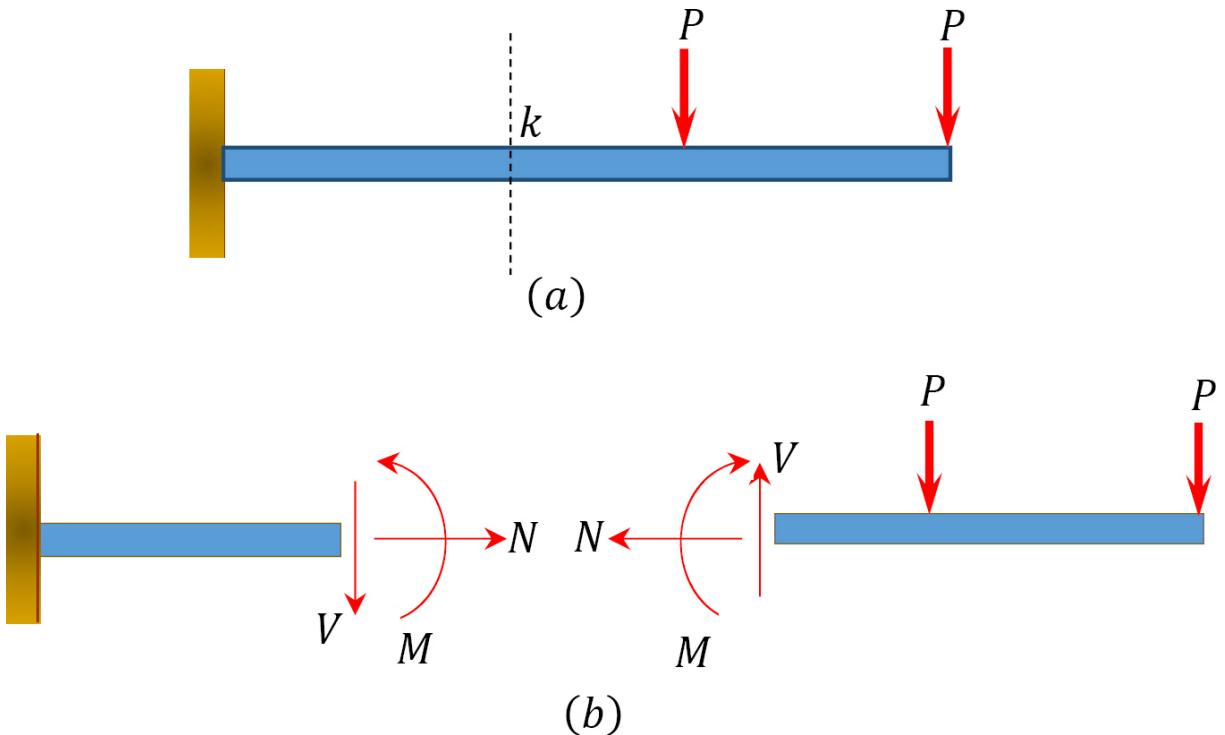
$$\sum F_x = \sum F_y = \sum F_z = 0 \quad (1)$$

$$\sum M_x = \sum M_y = \sum M_z = 0 \quad (2)$$

Para ser mantida a condição de equilíbrio do corpo do material sobre forças externas devem estar presentes forças e momentos internos ao seu corpo. Uma das mais importantes aplicações da estática na análise de problemas de resistência dos materiais é poder determinar os esforços internos presentes em um, esses esforços são necessários para manter sua integridade submetido a cargas externas, onde as forças e os momentos que agem em um ponto específico do corpo representam os efeitos resultantes da distribuição dessas forças no local (HIBBELER, 2010). A [Figura 3](#) apresenta uma representação gráfica da atuação de forças internas em um material:

Uma vez que se tem a informação das forças internas atuantes em um ponto no corpo e na seção do material, então, pode-se partir para a análise das tensões e deformações do local de análise.

Figura 3 – Forças internas atuando em um corpo em equilíbrio



Fonte: <https://pressbooks.library.upei.ca/statics/chapter/3-types-of-internal-forces/> acesso em mar 2022

2.1.1 Deformação e limites do material

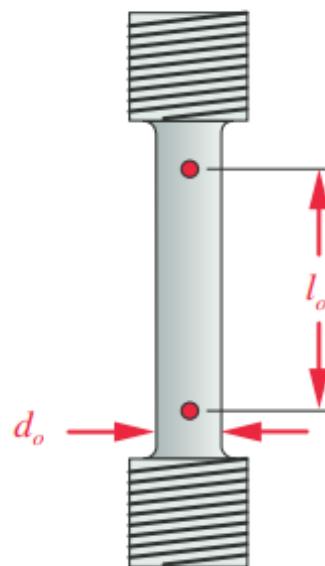
Quando um segmento de um corpo sob balanço estático se encontra sob a ação de forças internas, este segmento apresentará uma variação de comprimento e forma relativos á forças aplicadas. Deformação é definido como a mudança de comprimento por unidade de comprimento, logo, é um valor adimensional, e é calculada pela Equação (3) (NORTON, 2011).

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (3)$$

O método mais comum de definição das propriedades mecânicas de um material é realizando um teste de tração. O teste de tração consiste no lento e gradativo aumento da aplicação de uma carga de tração em um corpo de prova de material e dimensões conhecidas, até o momento em que o corpo de prova se rompe. Para realizar o teste é utilizado uma máquina que aplica as cargas e obtém com precisão os dados de forças aplicadas e de deslocamento apresentado no corpo do material (NORTON, 2011).

Os dados de deslocamento e força aplicada obtidos do teste de tração são relacionados para a confecção do diagrama tensão deformação do material do corpo de

Figura 4 – Corpo de prova de ensaio de tração



Fonte: (NORTON, 2011)

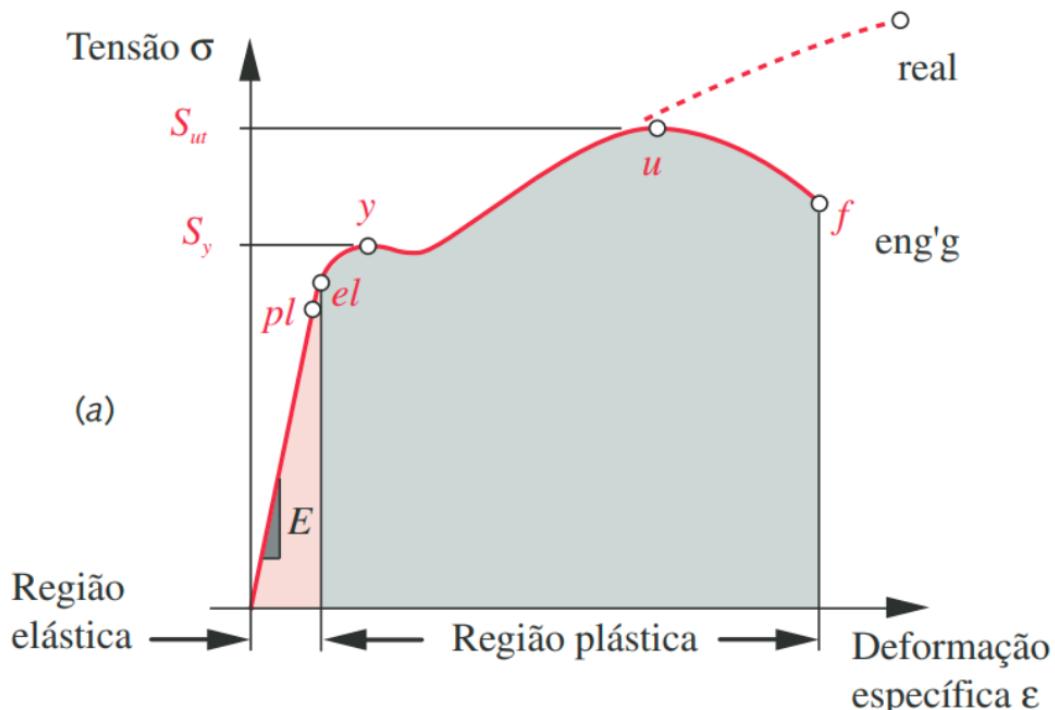
prova. Pela análise desse tipo de diagrama pode-se encontrar os limites de deformação de um material antes de sua ruptura. Hibbeler ressalta a importância na análise desse tipo de diagrama, uma vez que eles proporcionam meios para a obtenção de dados sobre resistência à tração ou compressão de um material independentemente das características geométricas em que é utilizado (HIBBELER, 2010). Um exemplo de diagrama tensão-deformação é mostrado na Figura 5.

Analizando o diagrama anterior pode-se notar uma zona de relacionamento linear entre a força aplicada no corpo de prova e sua deformação, nesta região é observado o comportamento de deformação elástica do material e sobre seu limite. Para aplicações de engenharia os pontos pl e el do diagrama são considerados os mesmos devidos á sua proximidade, este ponto representa o limite entre o comportamento elástico e plástico do material. (NORTON, 2011)

Na maior parte dos materiais de engenharia é verificada uma relação linear entre deformação e tensão dentro da região elástica, logo, um aumento nas forças externas aplicadas em um material resultam em um aumento proporcional das deformações locais caso a condição de tensão esteja dentro do limite elástico, esse fato foi descoberto por Robert Hooke, em 1676, em molas e é conhecido como Lei de Hooke (HIBBELER, 2010). A lei de Hooke é apresentada na Equação (4).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

Figura 5 – Exemplo de diagrama tensão-deformação



Fonte: (NORTON, 2011)

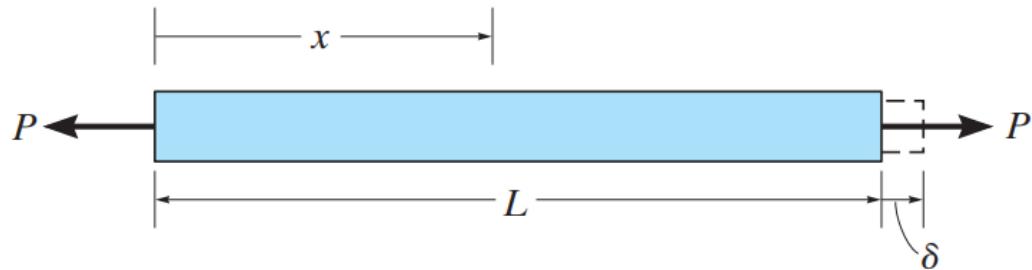
A variável E da equação da Lei de Hooke é representada a inclinação da curva tensão-deformação e é chamada de Módulo de Young, ou módulo de elasticidade do material (NORTON, 2011). Norton também afirma que o Módulo de Young “é uma medida da rigidez do material em sua região elástica e tem as mesmas unidades da tensão. A maioria dos metais exibe esse comportamento linear e também tem módulos de elasticidade que variam muito pouco com tratamentos térmicos ou com a adição de elementos de liga.”

Para uma barra constituída de um material homogêneo e isotrópico e submetida a forças axiais que tem seu centro de atuação no centro da seção da barra essas cargas irão gerar uma tensão normal uniforme ao longo do seu comprimento sobre a seção transversal (HIBBELER, 2010).

O alongamento ou contração de um segmento de reta por unidade de comprimento é denominado deformação normal e segue a Equação (5).

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (5)$$

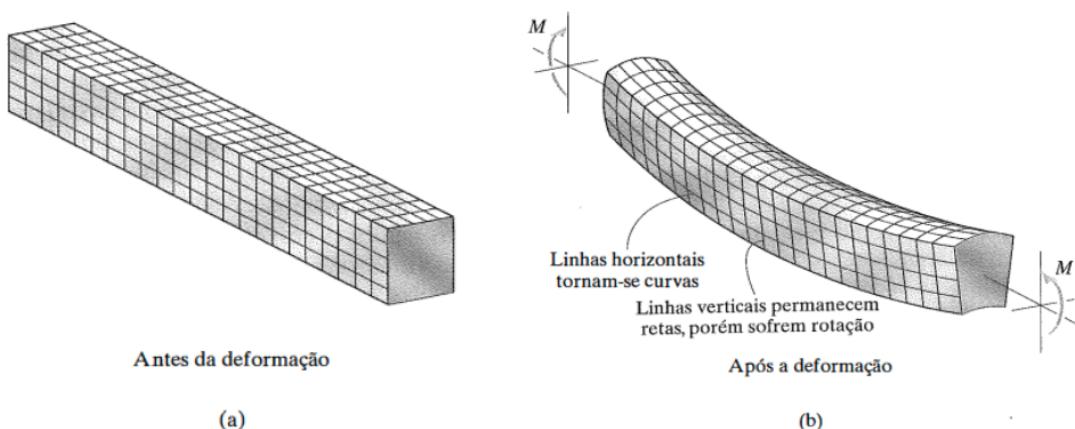
Figura 6 – Deformação de uma barra sob carga de tração

Fonte: ([HIBBELER, 2010](#))

2.1.2 Deformação de uma viga em flexão

A flexão é presente em um corpo sempre que as forças não são aplicadas na direção normal da sua seção transversal. O momento fletor é causado pelas cargas externas que tendem a fletir o corpo em torno do eixo perpendicular ao plano da área da seção transversal do material, e esse momento tende a produzir uma variação linear da tensão normal ao longo da seção de uma viga. ([HIBBELER, 2010](#)) A Figura 7 mostra uma representação ilustrativa do efeito do momento fletor em uma viga.

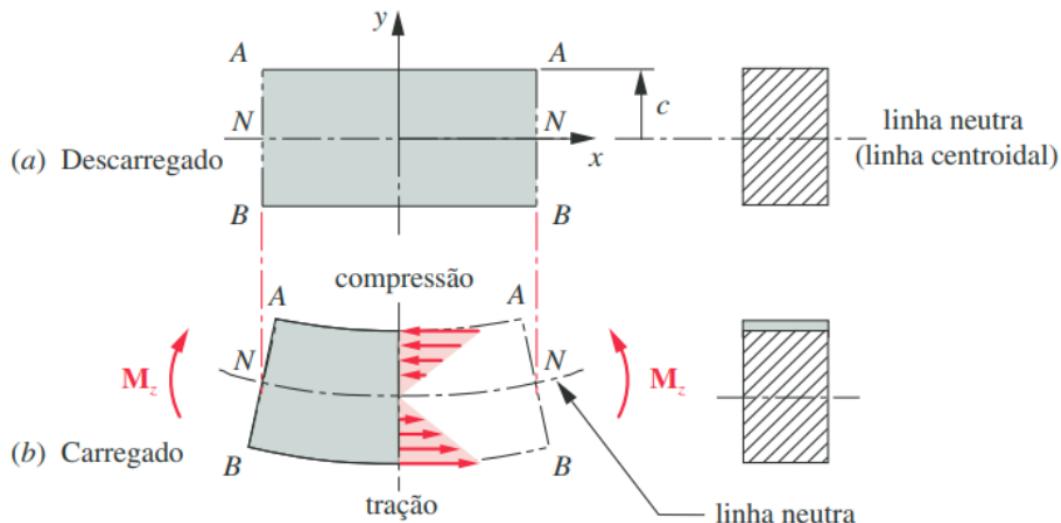
Figura 7 – Representação do efeito da deformação em uma viga sob flexão

Fonte: ([HIBBELER, 2010](#))

Em todo caso em que o material seja homogêneo e isotrópico e que a Lei de Hooke seja aplicável, pode-se relacionar o momento fletor presente com a distribuição de tensão na seção, como mostrado na [Figura 8](#). No caso da flexão a tensão normal, e consequentemente sua deformação, varia em função da distância entre o ponto

de análise e o centro da área da seção transversal do material (HIBBELER, 2010). A [Equação \(6\)](#) caracteriza a distribuição de tensão ao longo da direção y da seção transversal de uma viga.

Figura 8 – Deformação e distribuição de tensão em uma sob flexão



Fonte: (NORTON, 2011)

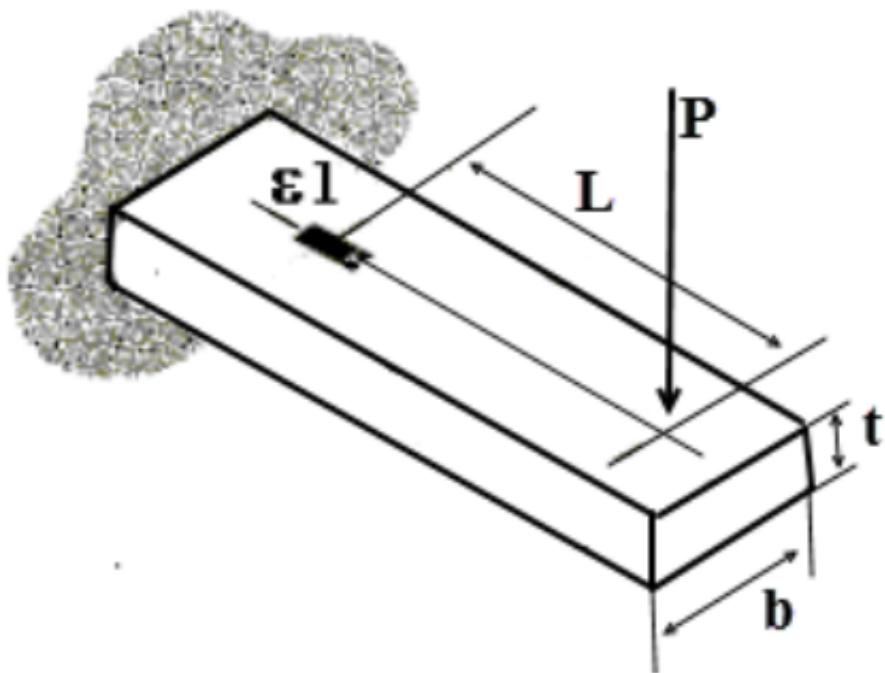
$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (6)$$

O valor de I representa o momento de inércia da seção do material sobre carga de flexão e a variável y representa a distância entre o centroide da seção transversal e o ponto de análise de tensão. Deve-se notar que as tensões máximas para qualquer corpo em flexão sempre acontecerão na superfície do material, e que enquanto um ponto qualquer está sob forças de tração, o ponto simétrico a este estará sob forças de compressão.

Uma vez conhecido o módulo de elasticidade do material e a distribuição de tensão na seção de um corpo sob flexão, pode-se combinar a [Equação \(6\)](#) com a equação da lei de Hooke para obter os valores de deformação na superfície causados pelas cargas de flexão. Para uma situação como na mostrada na [Figura 9](#) a deformação em um ponto na superfície à distância L da força aplicada pode ser encontrada pela [Equação \(7\)](#)

$$\varepsilon = \frac{6PL}{Ebt^2} \quad (7)$$

Figura 9 – Viga retangular sob flexão



Fonte: ()

As deformações em um componente podem ser altamente visíveis ou praticamente imperceptíveis se não forem utilizados equipamentos que façam medições precisas ([HIBBELER, 2010](#)). Considerando essa afirmação deve-se também ser estudado o método experimental de obtenção de dados de deformação nos componentes.

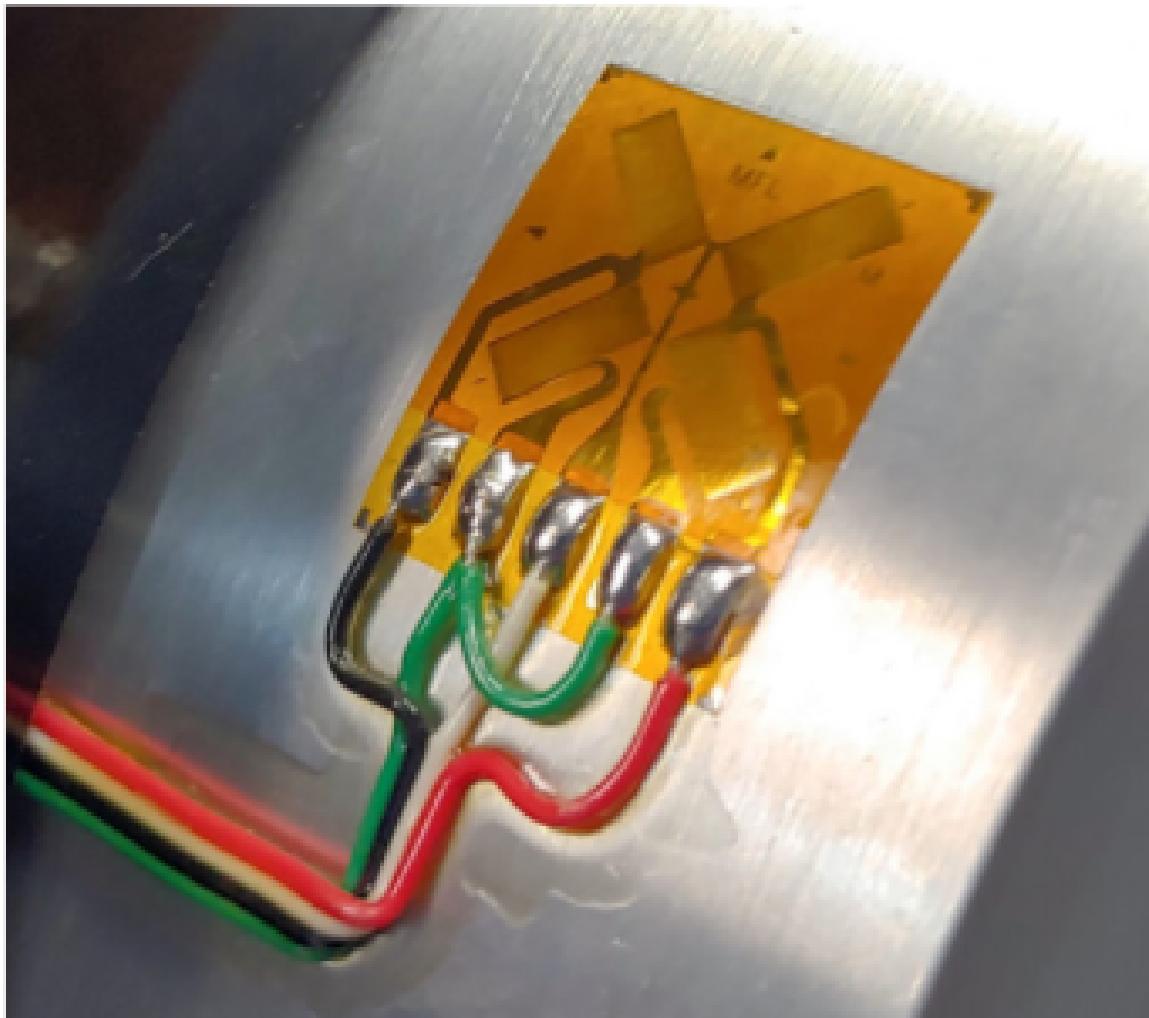
2.2 EXTENSOMETRIA

O extensômetro de resistência elétrica é o dispositivo mais utilizado para medir a deformação em uma superfície. O princípio de funcionamento desse tipo de sensor é baseado no efeito de variação de resistência elétrica de um condutor quando ocorre uma variação de área da sua seção transversal ([HOLLMAN, 2011](#)).

Caso um extensômetro esteja fixado a um corpo de um material em uma direção específica, como na [Figura 10](#) qualquer carga que deforma a superfície desse corpo de prova irá deformar igualmente o extensômetro, logo pode-se considerar o extensômetro como uma parte integrante do corpo de prova e qualquer deformação que aconteça no corpo de prova acontecerá igual no extensômetro ([HIBBELER, 2010](#)).

O fator de extensão ou gage factor, parâmetro que especifica a relação entre a variação da resistência nominal em um extensômetro para um valor unitário de deformação, é um valor especificado pelo fabricante, então, e a resistência nominal do extensômetro são valores especificados pelo fabricante do sensor, então, medindo

Figura 10 – Extensômetro fixado á um corpo de prova



Fonte: <https://binsfeld.com/category/strain-gage/> acesso em fev 2022

um valor e variação de resistência elétrica no extensômetro pode-se obter um valor de deformação local (HOLLMAN, 2011). A Equação (8) mostra uma relação entre a variação de resistência elétrica no extensômetro e os parâmetros repassados pelo fabricante.

$$k\varepsilon = \frac{\Delta R_s}{R_s} \quad (8)$$

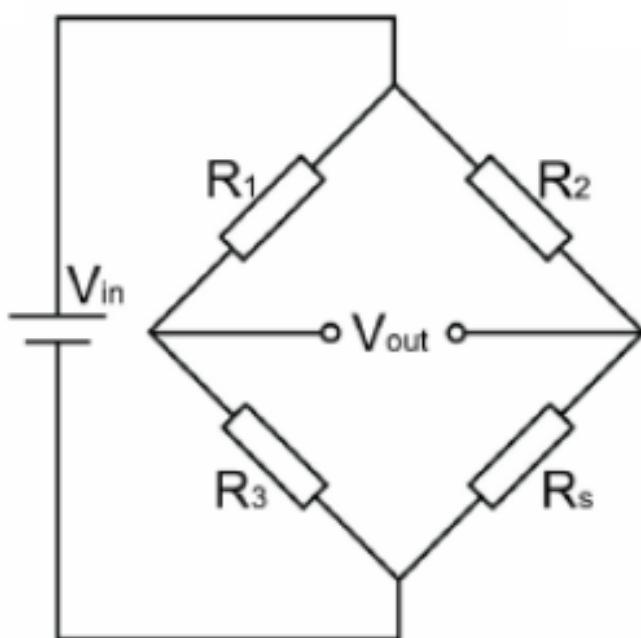
Porém, deve-se notar que os valores de deformação esperados para um metal dentro de sua zona de deformação elástica são muito pequenos, o que acarreta em pequenas variações de resistência no extensômetro. Com o objetivo de facilitar a medição da deformação, devem ser utilizados artifícios de instrumentação como um circuito de ponte com a finalidade de detectar com maior sensibilidade as variações de

resistência do sensor.

2.2.1 Ponte de Wheatstone

Circuitos de ponte são utilizados para prover melhores medições e precisões em uma variedade de aplicações de medição de resistência elétrica, indutância e capacidade sob condições tanto estáticas quanto transientes. Dentre diversos tipos de circuitos de ponte a ponte de Wheatstone, mostrada na [Figura 11](#), é um dos tipos de circuito elétrico mais utilizado para facilitar a leitura da variação de resistência de sensores que apresentam baixas variações de resistência elétrica na sua operação ([HOLLMAN, 2011](#)).

Figura 11 – Ponte de Wheatstone



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Monolithic-integration-of-a-Wheatstone-bridge-circuit-with-the-paper-based-sensor-A_fig224225141
acesso em fev 2022

A ponte de Wheatstone é normalmente utilizada em comparações e medições de resistência elétrica que variam de 1Ω até $1 M\Omega$ ([HOLLMAN, 2011](#)). A [Equação \(9\)](#) é obtida utilizando as leis de kirchhoff para obter o valor de tensão entre pontos B e D.

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (9)$$

Em uma aplicação onde o sensor de deformação representa uma resistência variável dentro do circuito e os outros resistores apresentam resistências iguais ao do valor nominal do sensor utilizado, pode-se combinar a equação prévia com a equação do fator de extensão para obter uma relação entre tensão obtida e valor de extensão apresentado no sensor, logo a equação de transferência do circuito é representada na [Equação \(10\)](#).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (10)$$

Circuitos de ponte se mostram de grande utilidade em experimentos práticos e são amplamente utilizados na medição da resistência de transdutores como extensômetros e outros tipos de sensores que convertem uma grandeza física em uma variação de resistência. Para medições estáticas, a tensão de saída do circuito de ponte é normalmente medido utilizando um voltímetro ou um dispositivo de coleta de dados de tensão ([HOLLMAN, 2011](#)).

Uma vez conhecido o fato de que não aconteceram grandes variações de tensão em um extensômetro na sua operação, devido ao fato do material apresentar pequenos valores de deformação dentro de sua zona elástica, pode-se concluir que o sinal de saída da ponte de Wheatstone ainda não apresentará altos valores de tensão, logo, deve-se estudar métodos de amplificação dessa tensão com o objetivo de facilitar a obtenção das leituras por um voltímetro digital ou placa de controle.

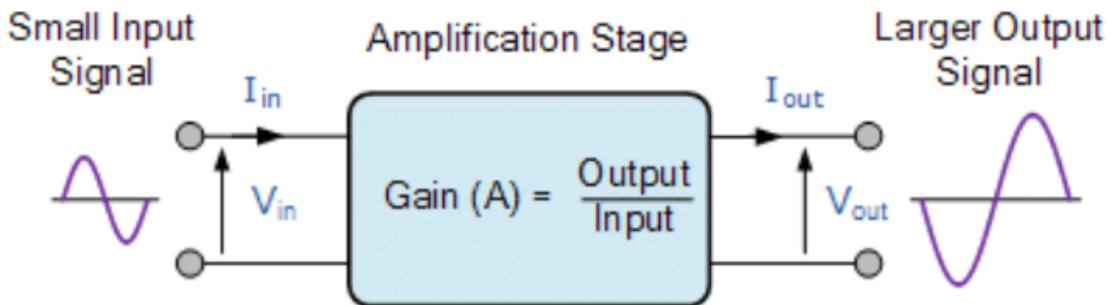
2.3 OBTENÇÃO DE SINAIS

Medidas experimentais podem ocorrer de diversas formas e em vários casos os sinais são considerados fracos, logo eles devem ser amplificados com o objetivo de facilitar sua utilização por um dispositivo de saída. A maior parte dos amplificadores de sinal atuais utilizam circuitos integrados ou dispositivos de estado sólido para amplificar um sinal fraco analógico ([HOLLMAN, 2011](#)).

O princípio de funcionamento de um amplificador de sinal é mostrado na [Figura 12](#). O grau de amplificação de um amplificador pode ser dado pela [Equação \(11\)](#), que relaciona o sinal de entrada recebido pelo amplificador de sinal com o sinal de saída, que é lido pelo controlador.

$$Gain(A) = \frac{\text{input}}{\text{output}} \quad (11)$$

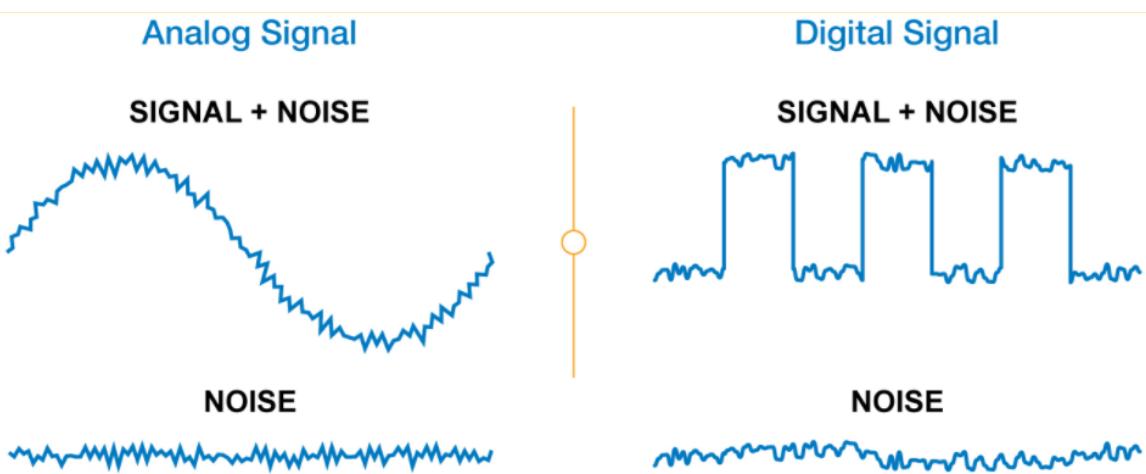
Figura 12 – Princípio de funcionamento de um amplificador de sinal



Fonte: https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_1.html
acesso em fev 2022

Ruídos característicos sempre estarão presentes em situações de tomada de medidas, como ilustrado na Figura 13. Os ruídos acontecem devido a efeitos aleatórios ou conhecidos e podem ser filtrados utilizando circuitos que apenas permitem que uma certa parte das frequências que compõem o sinal obtido passem adiante no circuito a fim de modificar o sinal de saída do amplificador. Essa filtragem dos ruídos não resolvem todos os problemas que podem ser encontrados, porém melhora significativamente o resultado de um experimento (HOLLMAN, 2011).

Figura 13 – Ilustração de ruídos presentes em sinais analógicos e digitais

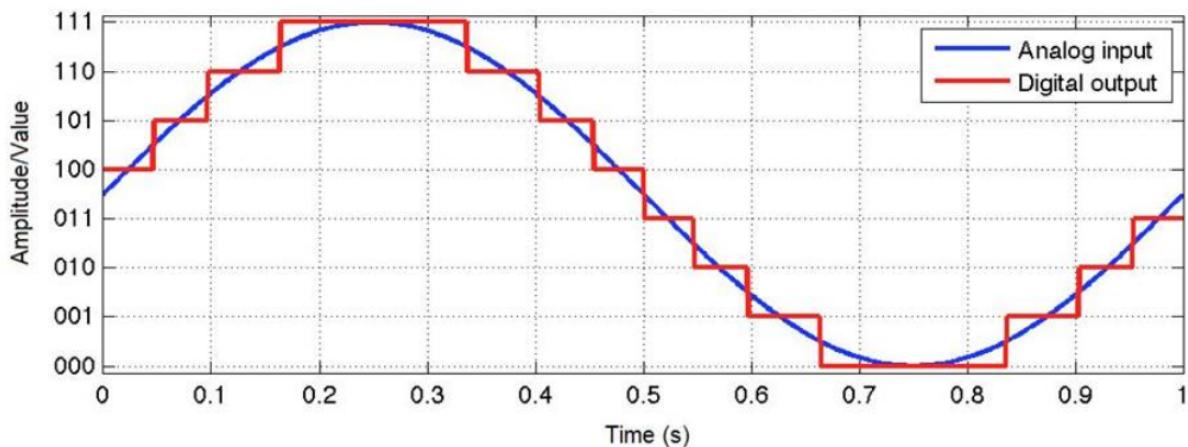


Fonte: www.quora.com/How-can-digital-signals-possess-noise-immunity acesso em fev 2022

Uma vez que os sinais encontrados até aqui no sistema são de característica analógica e espera-se que a utilização e tratamento deles ocorra em um computador ou placa controladora como o ESP32, que opera de maneira digital, deve-se então

converter essas informações de tensão de um meio analógico para um meio digital, para isso é utilizado um conversor digital-analógico. Em um meio analógico, as variáveis físicas são processadas como valores num meio contínuo, enquanto em um meio digital, valores são caracterizados por uma representação discreta, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Representação gráfica de um sinal analógico em forma digital



Fonte: www.arrow.com/en/research-and-events/articles/engineering-resource-basics-of-analog-to-digital-converters acesso em fev 2022

Uma das razões para o tratamento de sinais de maneira digital é amenizar o efeito de ruídos durante a transmissão do sinal devido ao fato de que valores no meio discreto são menos sensíveis a ruídos por possuírem apenas dois valores de estados possíveis, 0 ou 1. Em contrapartida os sinais analógicos são muito mais sensíveis a ruídos pois podem apresentar uma infinidade de valores possíveis dentro de um meio contínuo, logo, qualquer ruído pode alterar os valores transmitidos dos sinais (HOLLMAN, 2011).

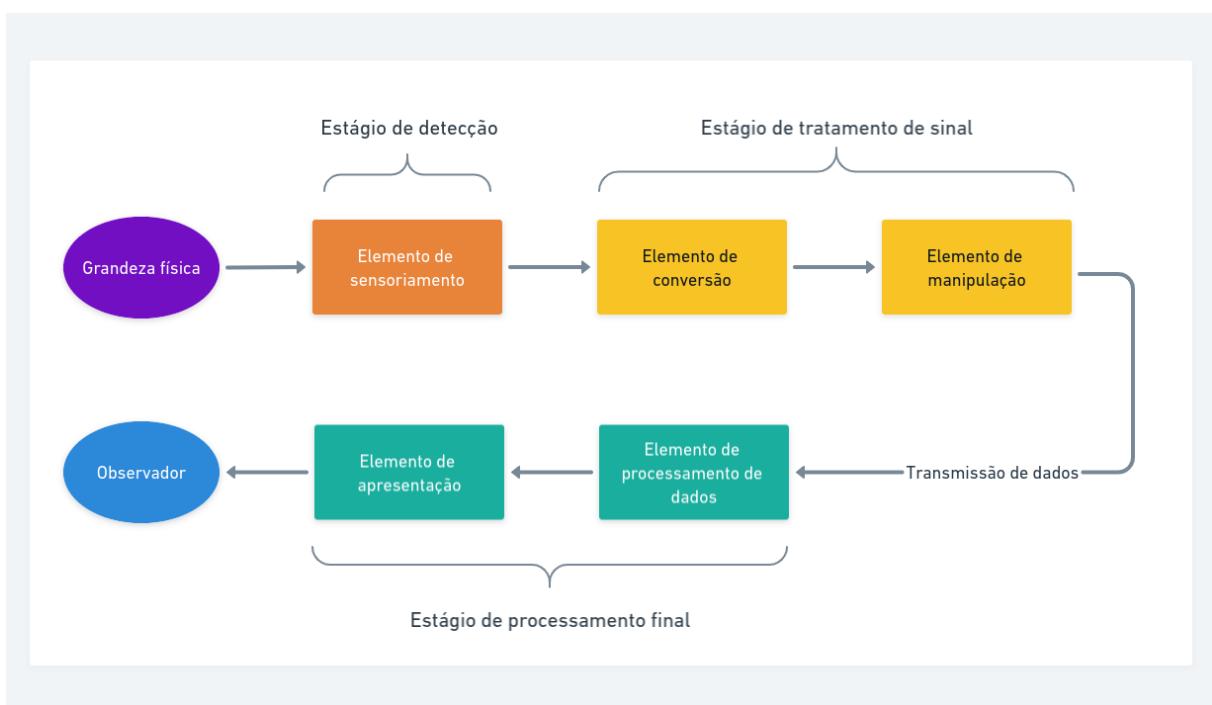
Com a finalidade de não ser perdidas informações no momento de conversão de um sinal do meio analógico para a forma digital, deve ser seguido o teorema sampling que estipula que a taxa de leitura de um sinal de maneira digital necessita ser pelo menos duas vezes o valor da frequência desse sinal no meio analógico (HOLLMAN, 2011).

A aquisição e processamento subsequente dos sinais obtidos pode ser feito de diversas formas, desde simples cálculos e obtenção manuais de dados até utilizando rotinas computacionais complexas. O objetivo do sistema de aquisição de dados é o de coletar, processar e/ou armazenar os dados obtidos em um experimento ou medição (HOLLMAN, 2011).

2.4 SISTEMAS DE MEDIÇÃO

A maior parte dos sistemas de medição podem ser divididos em três estágios principais, um estágio de detecção da medida física, um estágio intermediário tratamento de sinal e um estágio final, que engloba o processamento do sinal por um dispositivo de controle e a apresentação dos resultados por um observador (HOLLMAN, 2011). Uma representação esquemática de um sistema de medição genérico é ilustrado na [Figura 15](#).

[Figura 15 – Diagrama de blocos dos estágios de um sistema de medição](#)



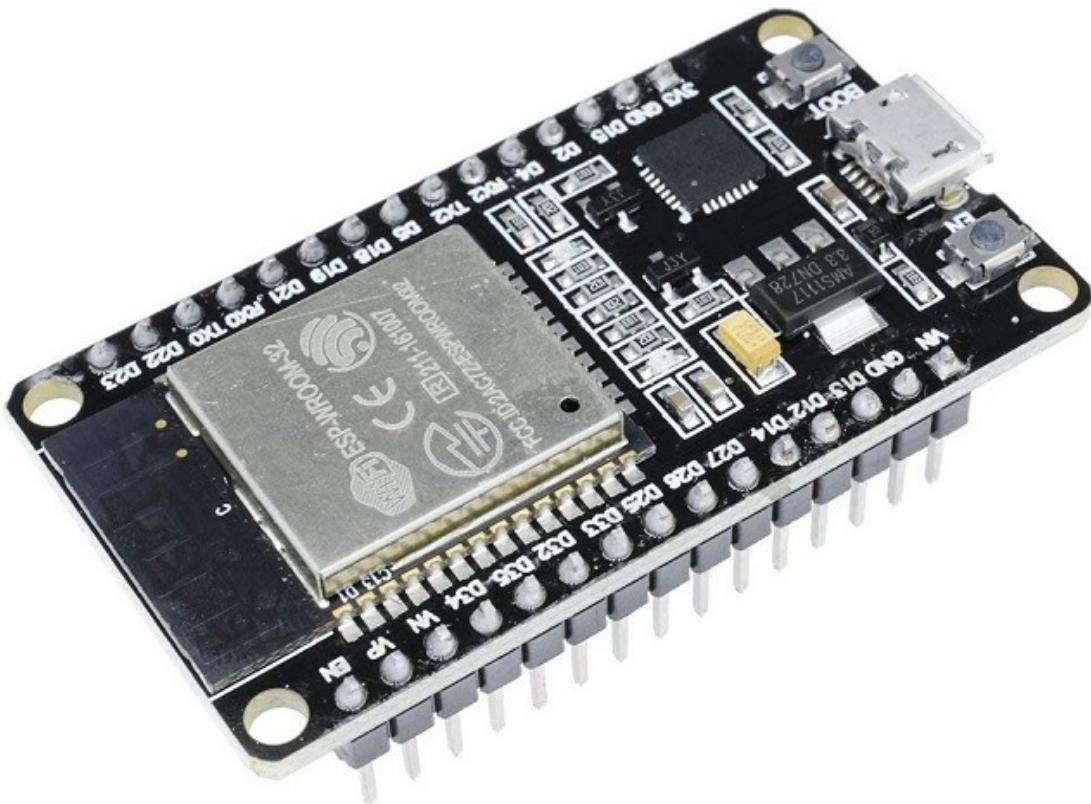
Fonte: O autor 2022

Uma medição é considerada estática quando a grandeza física analisada não apresenta mudanças no tempo. Um exemplo de medição estática seria a análise da deformação superficial de uma viga sob a ação de uma carga constante de flexão. Se o tipo de carregamento do exemplo fosse de forma cíclica ou apresentasse vibrações consideráveis, então não pode mais se considerar o sinal como sendo estático ([HOLLMAN, 2011](#)).

Para desenvolver o sistema de controle e obtenção do sinal foi utilizado a plataforma de desenvolvimento ESP32, mostrado na [Figura 16](#). Suas principais vantagens sobre a plataforma Arduino, que é mais amplamente utilizada, é devido ao fato de que o ESP32 apresenta em sua construção módulos de comunicação sem fio bluetooth e wireless integrados, o que eventualmente reduz complexidade e preço do dispositivo por não ser necessária a utilização de um módulo de comunicação externo ([ESPRESSIF](#),

2022).

Figura 16 – Controlador ESP32



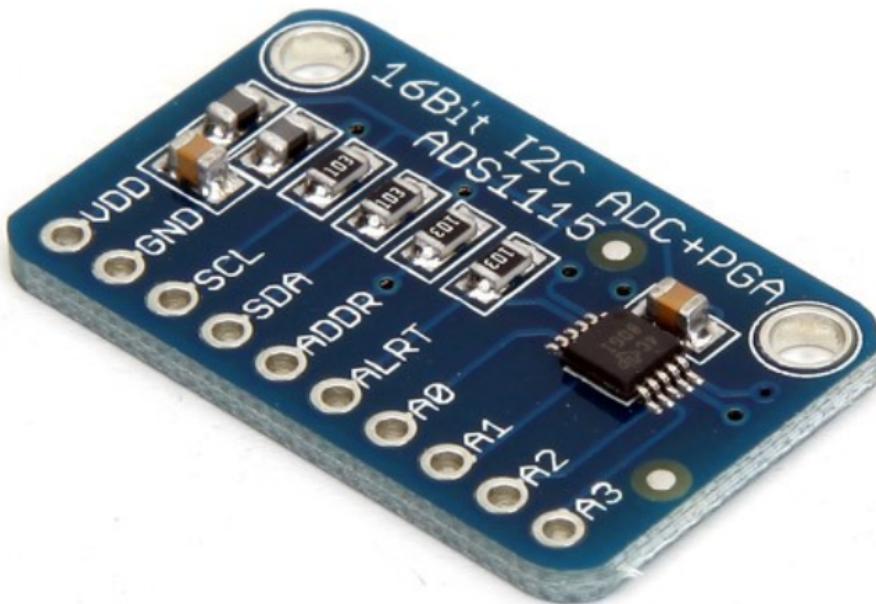
Fonte: [amazon.com](https://www.amazon.com)

A programação do controlador é feita utilizando uma linguagem de programação baseada na linguagem C ++ adaptada para a utilização em placas de controle utilizando o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE, que permite a utilização de extensões para programação e utilização de módulos externos, como o amplificador de sinal.

O ADS1115 é um conversor analógico digital, mostrado na [Figura 17](#). É um módulo de precisão com amplificador de ganho programável, e que tem resolução de 16 bits. O módulo é capaz de obter sinais na frequência de até 860 amostras por segundo e consegue sensoriar sinais na faixa de tensão de $\pm 256m$, isso permite o sensoriamento de sinais de baixa energia com alta resolução ([INSTRUMENTS, 2022](#)).

Os dados obtidos pelo sistema de medição são todos em formato digital em forma de vetores unidimensionais compostos pelos valores das amostras obtidas durante o tempo do experimento, esses valores são transmitidos em tempo real para um computador que executa um programa de obtenção de dados para realizar transformações mais complexas e análises dos sinais obtidos em tempo real.

Figura 17 – Conversor analógico digital ADS1115



Fonte: amazon.com

2.5 ANÁLISE DOS SINAIS OBTIDOS

Algum tipo de análise deve sempre ser feita em todo tipo de conjuntos de dados experimentais. Várias considerações entram na determinação final da validade dos resultados experimentais, erros podem acarretar na invalidade dos dados mesmo quando estes foram obtidos com cautela. Alguns erros são de natureza aleatória, e outros podem ser por natureza física ou por descuido do experimentador, como flutuações eletrônicas, fricção ou desgaste dos componentes, esses tipos de erros devem ser descartados imediatamente ([HOLLMAN, 2011](#)).

Leituras individuais em um instrumento podem variar devido a erros de natureza aleatória, que seguem uma distribuição estatística normal, e o experimentador pode estar desejando obter o valor médio de diversas leituras realizadas ([HOLLMAN, 2011](#)). A [Equação \(12\)](#) obtém o valor médio para uma medição experimental consistente de diversas leituras.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

Para cada leitura é esperado um valor de desvio lido, deve se notar que quanto melhor for o sistema de medição menor serão os valores de desvio obtidos no conjunto

de leituras, o desvio padrão, representado pela [Equação \(13\)](#), se mostra como um bom indicador da situação dos desvios, e consequentemente da exatidão de um sistema de medição.

$$Dp = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (13)$$

Essa equação de desvio padrão deve ser utilizada para grandes populações de amostras ou para quando os dados obtidos podem ser comparados com grandezas conhecidas ([HOLLMAN, 2011](#)). Para se obter a informação de se os valores experimentais estão de acordo com os desejados pode-se utilizar o teste do chi quadrado, representado na [Equação \(14\)](#).

$$\chi^2 = \sum \frac{(observed_i - expected_i)^2}{expected_i} \quad (14)$$

Esse teste é uma importante ferramenta de teste de qualquer resultado de distribuição experimental esperada. Se o valor de chi quadrado é igual a zero então a distribuição assumida é exatamente a distribuição real, quanto maior o valor de chi quadrado, menor é a correlação entre os dados medidos e os reais. ([HOLLMAN, 2011](#))

2.5.1 Ambiente de desenvolvimento computacional Python

A linguagem computacional Python é utilizada tanto para desenvolvimento do software que realiza a comunicação entre o sistema de medição e o computador durante a utilização, quanto para a criação de rotinas para obtenção dos dados estatísticos para cada amostra obtida.

Python é uma linguagem de programação de alto nível com sintaxe simples de fácil leitura e entendimento. É possível a utilização de extensões e pacotes com funções pré desenvolvidas para resolver diversos problemas computacionais encontrados pelos programadores ([TIM HALL, 2010](#)).

Uma das extensões principais que é utilizado neste trabalho é o Requests, que é um pacote com funções que tem como objetivo simplificar as operações de requisição e obtenção de dados entre dispositivos que se encontram conectados á uma mesma rede, seja ela uma rede local ou na rede mundial de computadores ??.

A extensão Numpy é um pacote fundamental para computação científica utilizando a linguagem de programação Python. O Numpy é uma ferramenta utilizada para o processamento de dados em forma vetorial, uni ou multidimensional, seu funcionamento é baseado na conversão dos dados numéricos do formato de lista para um formato específico, altamente otimizado chamado ndarray. O pacote Numpy também apresenta

diversas funções matemáticas, lógicas, estatísticas, algébricas feitas para serem utilizadas com objetos ndarray, isso acarreta na maior facilidade de programação e na minimização de processamento de um programa se comparado com a utilização de funções nativas de Python ([NUMPY, 2022](#)).

Uma grande gama de outros pacotes em python usam como base a estrutura de dados e funções presentes, como o Pandas, que é utilizado para facilitar a manipulação e armazenamento de dados em formato de tabular, como planilhas e bancos de dados ([DocsPandas](#)). Dados em formatos tabulares do Pandas podem facilmente ser processados, analisados e armazenados utilizando funções do Numpy e funções nativas do Pandas.

Com o auxílio do processamento de dados tabulares e utilizando as funções estatísticas do pacote Numpy pode-se facilmente obter os valores nominais e de erro de cada medida tomada com o dispositivo de medição.

2.6 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE PRODUTO

Desenvolvimento de produto entende-se como o processo de transformação de informações e conceitos até a produção e uso de um produto. Para se desenvolver um novo produto é necessário saber o que fazer, para quem fazer, quando fazer, com que fazer e como fazer. Esta organização é denominada metodologia de projeto ou metodologia de desenvolvimento de produtos. ([BACK et al., 2008](#))

O projeto de um produto engloba todas as etapas de definição das funções e características operacionais necessárias em um produto a ser desenvolvido, o modelo PRODIP divide o projeto em macro etapas, cada uma contemplando uma fase do desenvolvimento de um produto, uma visão geral das etapas dessa metodologia é mostrada na [Figura 18](#). ([NEDIP-UFSC, 2022](#)).

Figura 18 – Etapas da metodologia PRODIP



Fonte: ([NEDIP-UFSC, 2022](#))

Novos produtos não precisam ser necessariamente produtos totalmente originais. Um produto novo pode ser obtido pela atualização, melhorias e/ou modificações de

um produto existente, desta forma um produto existente pode ser reintroduzido a um novo nicho de mercado, e ele será considerado um novo produto. Para problemas de pequeno porte, pode ocorrer de que não exista a necessidade de se seguir um longo e rigoroso caminho para o desenvolvimento do projeto do produto ([BACK et al., 2008](#)).

Embasado no argumento indicado por Back em sua obra, a metodologia seguida segue as etapas apresentadas na metodologia PRODIP, porém, nem todas as ferramentas e sub etapas apresentadas serão rigorosamente seguidas, neste trabalho o autor simplifica as macro etapas do projeto devido ao fato que o resultado final deste não será o de um produto em estado de produção em massa.

2.6.1 Fase de planejamento

A fase de planejamento do projeto visa definir as etapas de desenvolvimento das ideias selecionadas utilizando definições de escopo. Nesta etapa são definidas as ideias de problema e do produto, um mapeamento tecnológico, e organizadas as informações de mercado, produto e tecnologias, que são correlacionadas e servem de base para estabelecer o plano do produto ([NEDIP-UFSC, 2022](#)).

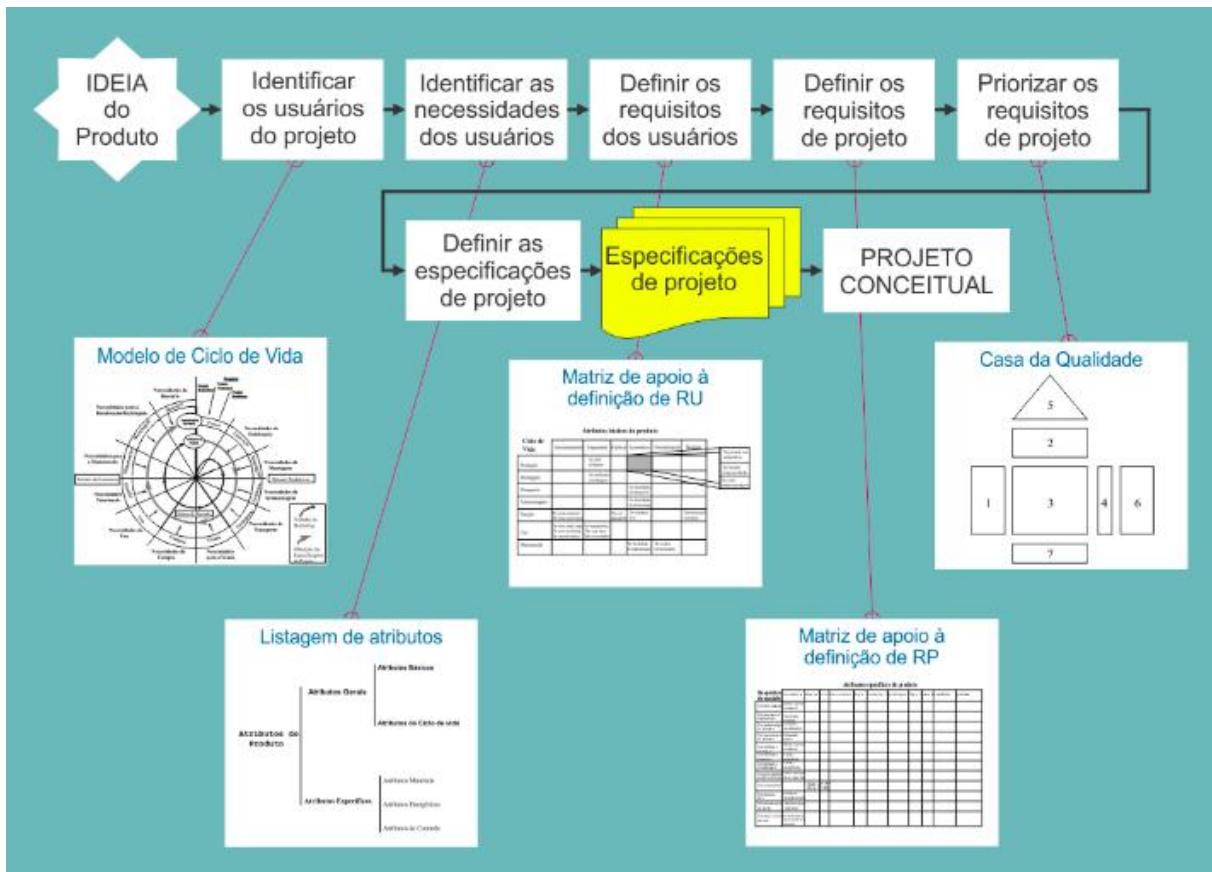
O resultado da fase de planejamento do projeto é um documento que contém informações relacionadas ao escopo do projeto, como o problema a ser resolvido e as ideias base de resolução do problema. O escopo elaborado é o principal guia que direciona o desenvolvimento do produto e de suas funcionalidades. As próximas etapas apresentadas do projeto servem para solucionar metodologicamente o problema base definido no escopo.

2.6.2 Projeto informacional

Nessa fase o objetivo é o estabelecimento das especificações de projeto, as quais irão orientar o desenvolvimento técnico do produto. Dentro os métodos do projeto informacional, mostrados na [Figura 19](#), a principal ferramenta é a matriz da casa da qualidade QFD (Quality Function Deployment). O projeto informacional utiliza ferramentas para definição de especificações de projeto que irão orientar o desenvolvimento do produto, o principal é a matriz QFD, utilizada para definir a importância dos requisitos do produto ([NEDIP-UFSC, 2022](#)).

No final do projeto informacional, é obtido de maneira clara e organizada quais são os requisitos do cliente em relação ao produto que está em desenvolvimento e quais são as funções o produto necessários que o produto necessita ter a fim de realizar os requisitos do cliente. Também se obtém, de forma quantizada, a ordem de prioridade nas quais o projeto necessita realizar os requisitos.

Figura 19 – Etapas do projeto informacional



Fonte: ([NEDIP-UFSC, 2022](#))

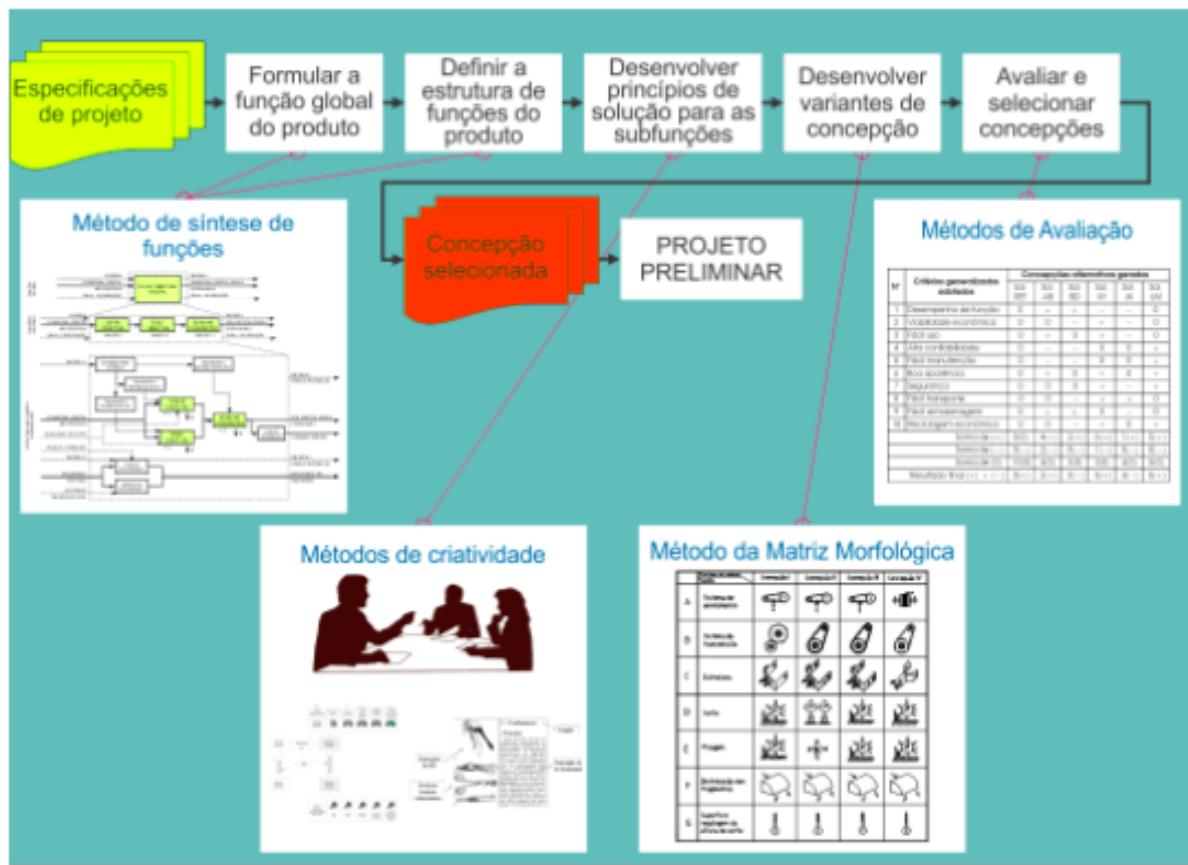
2.6.3 Projeto conceitual

Nesta etapa do projeto inicia-se o projeto e desenvolvimento das soluções conceituais para se atingir os requisitos obtidos na etapa anterior, o projeto conceitual é caracterizado pela fase criativa onde são geradas e avaliadas técnica e economicamente as alternativas para resolução do problema. As principais ferramentas utilizadas no projeto conceitual são mostradas na [Figura 20](#) e dentre elas se destacam matriz síntese de funções, matriz morfológica e matrizes multi critério de seleção ([NEDIP-UFSC, 2022](#)).

2.6.4 Projeto preliminar

No projeto preliminar é definido a forma final do produto, nessa fase são definidas características geométricas, de montagem, materiais para fabricação, características ergonômicas e de segurança e processos de manufatura do produto. Também pode ser realizados testes com protótipos para prova de conceito e otimização das características do produto desenvolvido até essa fase. ([BACK et al., 2008](#))

Figura 20 – Etapas do projeto conceitual



Fonte: (NEDIP-UFSC, 2022)

Os resultados dessa fase são as documentações de viabilidade econômica e requisitos de manufatura, e um protótipo funcional do produto.

2.6.5 Projeto detalhado

A elaboração do projeto detalhado se destina a vários propósitos, como a aprovação do protótipo, a finalização das especificações dos componentes e o detalhamento do plano de manufatura (BACK *et al.*, 2008).

Nessa fase são gerados as documentações de especificação dos componentes, como desenhos técnicos, esquemas elétricos, planos de manufatura e softwares utilizados. Nesta fase são feitos testes em campo e laboratório e acontece a otimização do protótipo com objetivo de preparação para produção.

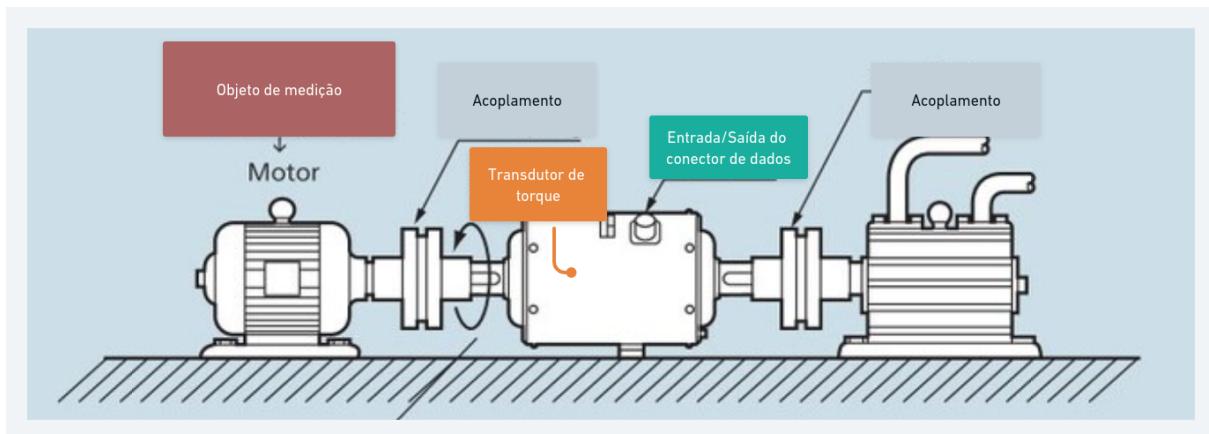
3 DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo é dividido em duas fases, a primeira apresenta o desenvolvimento e os resultados das etapas da metodologia de desenvolvimento do protótipo do dispositivo. E a segunda seção apresenta a metodologia do experimento utilizado como prova de conceito do dispositivo desenvolvido.

Como visto na seção de introdução é observado que existem diversas limitações e dificuldades no sensoriamento de cargas de torque em eixos, este trabalho é tem como objetivo desenvolver uma solução para tal problema assim criando uma alternativa que facilita o acesso e diminui os custos para a obtenção desses tipos de dados.

Um dispositivo existente que é utilizado para obter dado de cargas de torção são os transdutores de torque, que são dispositivos que tem como princípio de funcionamento a utilização de um sensor de deformação em um eixo de dimensões conhecidas que se encontra sob a atuação das cargas, esses dispositivos são utilizados em aplicações de experimento ou industriais. Os sinais de tensão obtidos são transferidos em tempo real utilizando contatos elétricos rotativos ([KYOWA, 2022](#)). A utilização de um transdutor de torque em uma aplicação industrial é mostrada na [Figura 21](#).

Figura 21 – Utilização de um transdutor de torque



Fonte: ([KYOWA, 2022](#))

Será desenvolvido um dispositivo baseado no funcionamento do transdutor de torque apresentado, porém, ao invés da transmissão de dados via contato elétrico rotativo será desenvolvido um conceito em que os dados são transmitidos via conexão sem fio, com o objetivo de se criar um produto que funcione de maneira totalmente remota sem a necessidade de utilização de nenhum chicote para a transmissão dos dados.

3.1 PLANEJAMENTO DO PROJETO

A primeira etapa para realizar o planejamento do projeto foi uma pesquisa de custo e disponibilidade de produtos iguais ou semelhantes a este propósito no mercado digital, os resultados da pesquisa são apresentados na próxima subseção.

3.1.1 Mapeamento tecnológico

Foram encontrados inúmeros dispositivos para telemetria e obtenção de sinais de sensores para aplicações industriais, no mapeamento foram considerados apenas os que foram encontrados a preços acessíveis. Dos produtos encontrados, dois se mostraram de grande semelhança ao conceito que será desenvolvido.

A empresa Isso disponibiliza em sua loja virtual um dispositivo para controle e obtenção de dados, denominados dmi tcr 44es, mostrado na Figura 22. Segundo o fabricante esse dispositivo é utilizado para aplicações de acionamentos e telemetria remota, e é indicado para uso em automações residenciais e industriais (ISSO, 2022). A empresa também disponibiliza outro modelo muito semelhante, denominado dmi tcr 88es, que possui maior número de conexões de entradas e saídas de sinais.

Figura 22 – Datalogger DMI TCR 44es



Fonte: (ISSO, 2022)

Outro dispositivo, denominado Bridge101A, mostrado na [Figura 23](#), fabricado pela empresa Madgetech foi encontrado. Segundo o fabricante é um dispositivo de obtenção de dados compacto que mede e armazena valores de tensões elétricas, e é normalmente utilizado com extensômetros, células de carga e outros sensores de baixa tensão, e é utilizado para calcular com precisão parâmetros de tensão, torque, deformação e pressão ao longo do tempo ([MADGETECH, 2022](#)).

Figura 23 – Dispositivo Bridge101A



Fonte: ([MADGETECH, 2022](#))

A [Tabela 1](#) mostra uma comparação entre os dados de utilização obtidos pela documentação dos dois dispositivos previamente apresentados.

Dentre os valores apresentados na tabela fica claro os altos preços envolvidos

Tabela 1 – Comparação entre dispositivos encontrados

	Isso DMI TCR 44es	Isso DMI TCR 88es	Madgetech Bridge101A
Dimensões	124x117x55mm	190x117x55mm	36x64x16mm
Comunicação com PC	Conexão Ethernet	Conexão Ethernet	Conexão USB
Taxa de leitura	Não disponibilizado	Não disponibilizado	4 hz
Faixa de tensão de leitura	Não disponibilizado	Não disponibilizado	±30 mV
Faixa de preço	R\$1100,00	R\$1300,00	R\$2800,00

Fonte: O autor 2022

em qualquer aplicação que necessite a utilização desse tipo de dispositivo. Muitos deles adicionalmente necessitam de softwares proprietários pagos para sua programação e utilização. O dispositivo desenvolvido neste trabalho tem como objetivo um preço consideravelmente menor que os analisados e programável e utilizável utilizando tecnologias de código aberto.

3.1.2 Pesquisa científica

Com o intuito de facilitar o desenvolvimento do dispositivo, foi realizada uma revisão sistemática de trabalhos científicos e acadêmicos disponíveis nas bases de dados Web of Science, Springer, Scencedirect e Google Scholar, utilizando como palavras-chave “Dynamic, Torque, Shaft, Sensor, Strain, Gauge”, os principais obtidos são apresentados nessa subseção.

Um artigo desenvolvido por Niedworok relata o desenvolvimento e aplicação de um sistema de sensoriamento de torque em tempo real em um eixo cardã de um carro de mina utilizando a medição da deformação utilizando extensômetro com transferência dos dados via radiofrequência. O trabalho também indica que o posicionamento do sensor necessita estar em contato com a superfície de maior deformação do componente, o autor realiza uma análise por elementos finitos para encontrar esse local. O artigo também aponta que o sinal vindo do sensor deve ser ampliado utilizando uma ponte de Wheatstone para conseguir ter a instrumentação correta da grandeza. O artigo mostrou resultados satisfatórios e não discutiu sobre ruídos e imprecisões presentes nos dados obtidos. ([NIEDWOROK, 2014](#))

Nurprasetio desenvolve, em seu trabalho, um sistema de medição para veículos terrestres, aplicado em uma bancada de testes que simula o estado de veículos terrestres em operação, o sistema utiliza um microprocessador Arduino nano de fácil acesso e baixo custo, em que os dados são transmitidos via comunicação bluetooth. O artigo também ilustra o processo de calibração do dispositivo feito antes do teste dinâmico, assim como no trabalho anterior, também é enfatizada a necessidade das metodologias de instrumentação do sinal vindo do extensômetro. Seus resultados também se mostraram promissores, porém o autor indica que é necessário a remoção

dos ruídos de medição, o que segundo ele será endereçado em um trabalho futuro ([NURPRASETIO et al., 2018](#)).

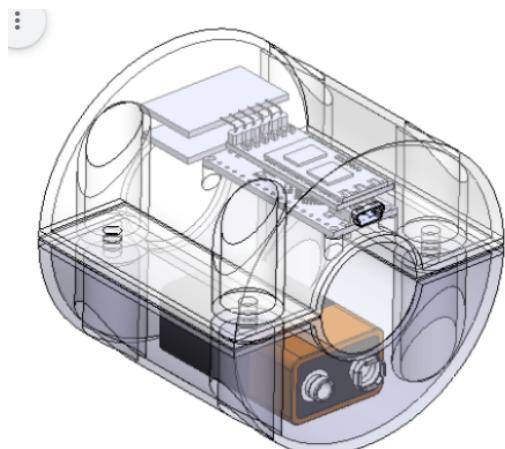
Gharghan compara um sistema de medição similar ao dos dois trabalhos prévios com um sistema de medição de torque em tempo real de alto custo utilizado por ciclistas profissionais no pedivela. O artigo introduz a tecnologia de transmissão de dados Zigbee, que consegue transmitir dados a um baixo consumo energético. Após a obtenção dos dados, o autor utiliza as ferramentas de análise estatística de Bland-Altman obtendo a porcentagem de erro médio absoluto para a validação do sistema ([GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL, 2017](#)).

Silva compara os dados de um sistema semelhante aos anteriores com resultados de análises de modelo matemático analítico e análise por elementos finitos aplicados em bancadas de viga engastada com carga na ponta e de torque aplicado em um eixo com um dos lados travados, diferente dos trabalhos anteriores, este possui uma seção com o desenvolvimento das equações dos modelos utilizados, e assim como os artigos anteriores foram encontrados resultados satisfatórios ([SILVA; VARANIS; MERELES, 2017](#)).

A ideia inicial da concepção do produto seria o do desenvolvimento de um dispositivo que obtivesse os valores de torque em um eixo em tempo real. Para que fosse possível solucionar tal problema, o dispositivo teria que obter os dados de tensão dos polos de uma ponte de wheatstone, com um extensômetro montado a um eixo sob torque e transmitir os dados obtidos via conexão sem fio em tempo real a um computador.

A modelagem de um produto conceito inicial baseado nos resultados da pesquisa de mercado e nos trabalhos científicos foi elaborado pelo autor utilizando o software Solidworks 2017, esta modelagem é mostrada na [Figura 24](#).

Figura 24 – Projeto inicial do dispositivo



Fonte: O autor 2022

O conceito é composto por uma placa de desenvolvimento Arduino nano, que controla um amplificador de sinal que por si obtém os dados de tensão de uma ponte de wheatstone. Os dados obtidos pela ponte de wheatstone então são transmitidos utilizando um módulo bluetooth HC-05. O custo total desses dois componentes é baixo, e um protótipo de dispositivo pode ser montado por aproximadamente R\$150,00, desconsiderando os componentes de encapsulamento. O projeto informacional é iniciado considerando este conceito como a ideia inicial do produto.

3.2 PROJETO INFORMACIONAL

Uma vez que a ideia inicial do produto é caracterizada pelo grande potencial de ser de baixo custo e de ser consideravelmente compacto em relação aos outros produtos encontrados no mercado, pode-se traçar uma estratégia de definição de público alvo, o que facilita as tomadas de decisão durante o desenvolvimento do produto. Os principais públicos identificados para a utilização do dispositivo são as equipes de competição veiculares universitárias, como as da competição Formula SAE e Baja SAE, uma vez que o baixo custo, baixas dimensões e flexibilidade de aplicação são características desejadas para utilização nesses grupos. O autor escolheu as equipes de competição Baja SAE como público alvo devido a proximidade com membros da equipa Baja SAE, da UFSC Joinville, e esse público alvo definido serve de ponto de início do desenvolvimento do projeto informacional do dispositivo.

Foi elaborado um formulário eletrônico que apresenta a ideia do conceito de funcionamento de um dispositivo para sensoriar dados de torque em tempo real. No formulário são apresentadas duas perguntas iniciais, que avaliam a importância da obtenção desse tipo de dado e a importância de serem obtidas em tempo real, além das duas perguntas iniciais, são apresentados os seguintes tópicos sobre a necessidade do produto em desenvolvimento de:

- a) Qual sua opinião sobre a importância da obtenção de dados de torque, potência e rotação do sistema de propulsão durante a utilização?;
- b) Qual sua opinião sobre o recebimento a distância e ilustração desses dados em tempo real?;
- c) Capacidade de gravação/armazenamento de dados;
- d) Ser de baixo preço;
- e) Ser compacto;
- f) Ser leve;
- g) Suportar grande variação da faixa de torque;
- h) Ser a prova de água, fluidos, poeira, lama, etc;
- i) Ser resistente a impactos;

- j) Ser de fácil utilização e montagem;
- k) Ser de fácil manutenção;
- l) Possuir bateria de longa duração (duração da prova mais longa);
- m) Possuir disjuntor/botão de liga/desliga;

Todas as perguntas e tópicos foram respondidos pela seleção de uma nota de 1 a 5 para cada questão, onde o valor 1 significa que o requisito listado é de baixa importância e o valor 5 é de extrema importância. As respostas do formulário são avaliadas pela análise do valor médio obtido pelos valores respondidos. Foram obtidas as respostas de 7 membros de diferentes equipes que participam da competição Baja SAE no Brasil. Os resultados são mostrados na [Tabela 2](#).

Tabela 2 – Resultado pesquisa de mercado

Pergunta/Requisito	Importância
Importância de obtenção dos dados	4.875
Importancia de obtenção em tempo real	3.875
Ser de baixo preço	3.625
Ser compacto	3.875
Ser leve	3.75
Suportar grande variação da faixa de torque	4.125
Ser a prova de água, fluidos, poeira, lama, etc	4.75
Ser resistente a impactos	4
Ser de fácil utilização e montagem	3.375
Ser de fácil manutenção	3.75
Possuir bateria de longa duração	4.25
Possuir botão de liga/desliga	3.375
Capacidade de gravação de dados	4.125

Fonte: O autor 2022

Com as respostas do formulário de pesquisa do público alvo, pode ser elaborada uma matriz de listagem de atributos, que serve para mapear quais funcionalidades produto deve ter para atender cada um dos requisitos do produto, e quais sistemas necessários para garantir as funcionalidades listadas, a matriz é mostrada na [Figura 25](#).

Figura 25 – Matriz de listagem de atributos



Fonte: O autor 2022

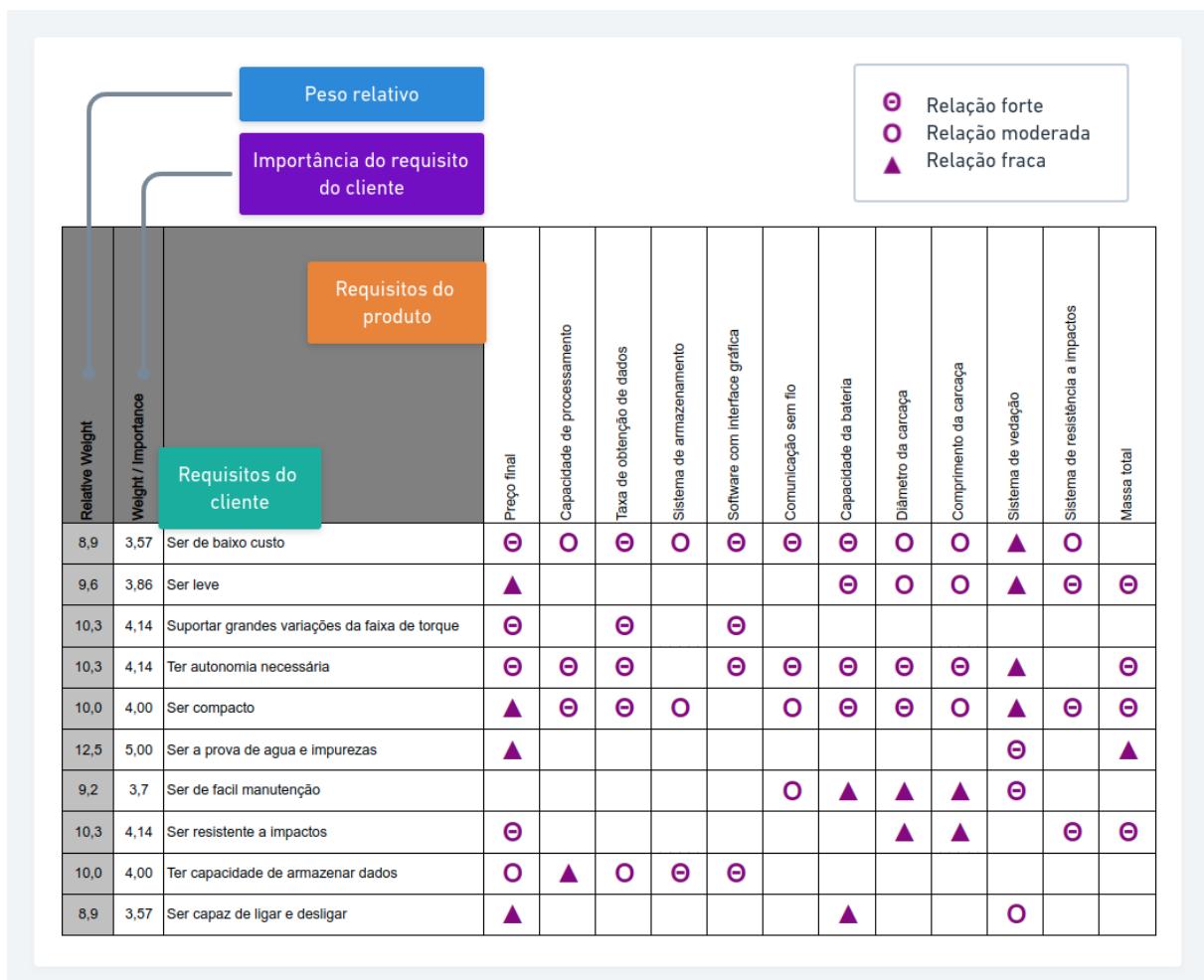
A partir da análise da matriz de listagem de atributos e da pesquisa com o público alvo é feito um levantamento das principais características do produto final:

- Preço final
- Capacidade de processamento
- Taxa de obtenção de dados
- Sistema de armazenamento
- Software com interface gráfica
- Comunicação sem fio
- Capacidade da bateria

- h) Diâmetro da carcaça
- i) Comprimento da carcaça
- j) Sistema de vedação
- k) Sistema de resistência a impactos
- l) Massa total

Com os dados de avaliação quantitativa dos requisitos do produto obtidos pela pesquisa com o público alvo e os dados das características do produto é elaborada uma matriz de avaliação de qualidade, ou QFD. Essa matriz serve para correlacionar os requisitos com as características desejadas do produto, com a finalidade de apontar quais as qualidades devem ser priorizadas na etapa de desenvolvimento do projeto. A zona de relacionamento da matriz QFD do produto desenvolvido é mostrada na Figura 26.

Figura 26 – Matriz QFD



Fonte: O autor 2022

Os símbolos preenchidos na matriz QFD representam os fatores de relação, que numericamente equivalem ao valor 9 para correlação forte, 3 para correlação média e 1 para correlação fraca. Os resultados de valor de importância para cada requisito do produto é calculado pelo somatório das multiplicações entre os fatores de relacionamento e o peso relativo relativos para cada requisitos do cliente em cada interseção na matriz QFD. Os resultados de priorização obtidos pela matriz QFD são apresentados na [Tabela 3](#).

Tabela 3 – Prioridade dos requisitos definidos pela matriz QFD

Característica	Peso de importância	Prioridade
Preço Final	429,5	alta
Capacidade de processamento	219,2	baixa
Taxa de obtenção de dados	385,4	média
Sistema de armazenamento	146,3	baixa
Software com interface gráfica	355,5	média
Comunicação sem fio	230,6	baixa
Capacidade da bateria	367,3	média
Diâmetro da carcaça	257,7	baixa
Comprimento da carcaça	197,9	baixa
Sistema de vedação	260,8	baixa
Sistema de resistência a impactos	295,8	baixa
Massa total	374,4	média

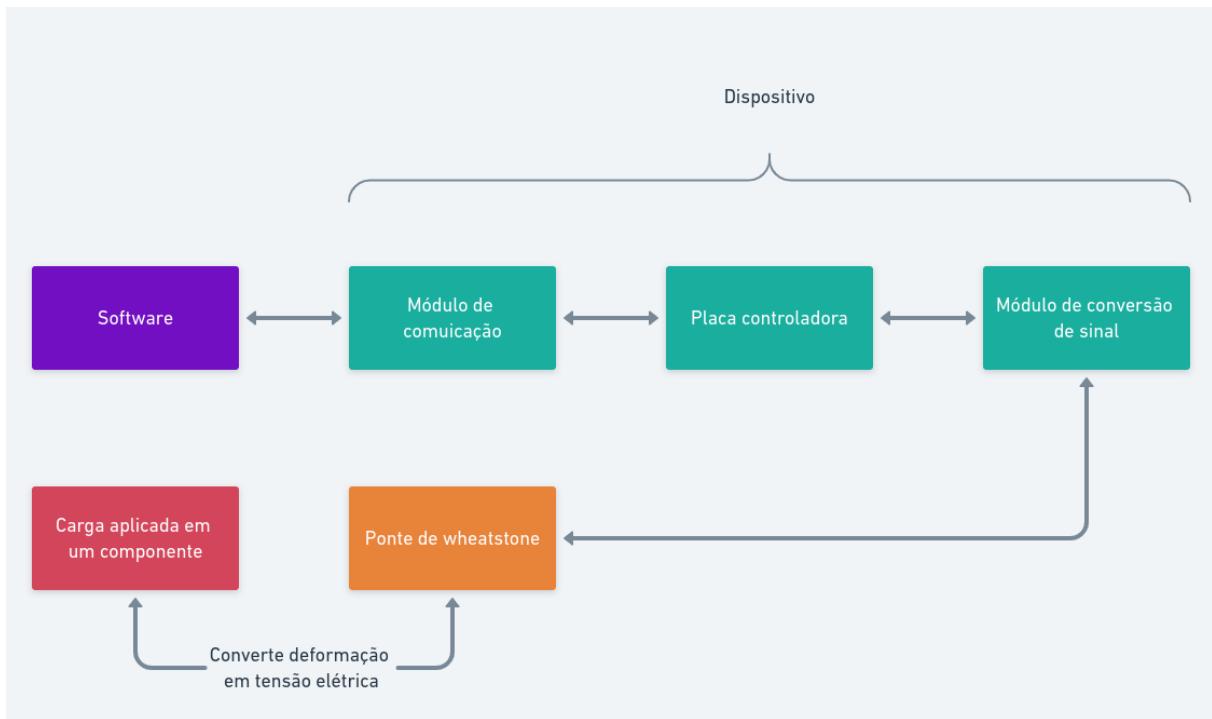
Fonte: O autor 2022

A Matriz QFD desenvolvida para o projeto informacional do dispositivo desenvolvida pode ser encontrada no [Apêndice A](#). A priorização dos requisitos é utilizado para guiar a tomada de decisões de projeto e escolha de componentes nos estágios do projeto conceitual.

3.3 PROJETO CONCEITUAL

Na fase de projeto conceitual são avaliadas tecnicamente e economicamente as alternativas levantadas para se desenvolver um dispositivo que atenda os requisitos de cliente e de projeto. O conceito de funcionamento básico do dispositivo é ilustrado na [Figura 27](#).

Figura 27 – Conceito de funcionamento inicial



Fonte: O autor 2022

As opções de placa controladora avaliadas foram o Arduino Nano, o ESP32 ou o ESP8266, todos podem ser programados utilizando a linguagem de programação Arduino, e podem ser encontrados por preços menores que 60 reais, as principais diferenças entre os controladores são de que os módulos ESP possuem opções de comunicação sem fio integradas.

Caso seja necessária a utilização de comunicação sem fio em um módulo que não possua integrado as principais opções disponíveis são o módulo bluetooth HC-05, que tem o custo aproximado de 50 reais e o módulo wifi ESP8266, que tem o custo aproximado de 25 reais. A comunicação bluetooth funciona com a transferência de dados diretamente entre o módulo e o receptor. E a comunicação wifi pode ser feita tanto pela conexão do dispositivo receptor diretamente ao módulo bluetooth quanto pela comunicação entre servidor e cliente.

As opções de módulo de amplificação de sinal avaliadas foram o HX711, que se apresenta como um módulo altamente utilizado em aplicações de células de carga porém apresenta uma taxa de leitura baixa, de até 80 amostras por segundo, e o ADS1115, que possui diversas opções de fator de amplificação que podem ser programadas e uma taxa de amostragem de 860 amostras por segundo. Ambos os módulos de amplificação já possuem conversores ADC integrados.

Apenas uma solução foi considerada como adequada para armazenamento de dados locais pelo dispositivo, que é a utilização de um módulo de cartão Micro SD, de-

vido às baixas dimensões. Também foram avaliadas opções de alimentação energética para o dispositivo, materiais para construção do encapsulamento externo. Uma breve apresentação do levantamento de componentes é mostrado na [Tabela 4](#).

Tabela 4 – Levantamento de componentes

Tipo de componente	Características principais	Preço aproximado
Controladores		
Arduino nano	compacto e fácil de programar	R\$60.00
ESP 32	comunicação sem fio integrada	R\$40.00
Amplificadores de sinal		
HX711	Desenvolvido para aplicações de célula de carga	R\$20.00
ADS1115	Alta taxa de leitura	R\$70.00
LM358	Alta taxa de ganho	R\$10.00
Comunicação sem fio		
Bluetooth HC-05	Difícil programação, emite e recebe dados	R\$50.00
Módulo wifi	Fácil acesso a qualquer dispositivo na mesma rede	R\$25.00
Módulo radiofrequênci	Comunicação apenas do transmissor para o receptor	R\$15.00
Armazenamento		
Módulo cartão micro SD + cartão SD	Permite armazenamento de dados	R\$30.00
Alimentação		
4x pilha AAA	mais compacto, alta disponibilidade	R\$30.00
1x Bateria 9V	alta tensão e duração	R\$40.00
2x Bateria li-ion	grandes dimensões, recarregável	R\$35.00
Encapsulamento		
Carcaça ABS	Pode fabricado por impressão 3D	–
Carcaça multi material	Maior custo com fabricação, maior resistência	–

Fonte: O autor 2022

Após feito o levantamento de componentes pode-se montar a matriz morfológica, que serve para relacionar cada função elementar principal originada da matriz de funções do produto com os componentes levantados anteriormente. A matriz morfológica é mostrada na [Figura 28](#).

Figura 28 – Matriz morfológica

Função Elementar	Princípios de solução			Critérios de seleção
Possuir sistema de amplificação de sinal	Módulo amplificador de sinal LM358	Módulo amplificador de sinal HX711	Modulo ADS1115	custo, dimensões, praticidade, desempenho
Possuir sistema de processamento de dados	Microprocessador Arduino nano	Microprocessador ESP32	Microprocessador ESP8266	custo, dimensões, praticidade, desempenho, gasto energético
Possuir sistema de armazenamento de dados	Modulo de armazenamento em cartão SD			custo, dimensões, praticidade
Possuir sistema de comunicação	Transferência de dados via bluetooth (IEEE 802.15.1)	Transferencia via Wi-fi (IEEE 802.11)	Tranferencia via radiofrequência	custo, desempenho, praticidade, gasto energético
Possuir sistema de plotagem de dados	Software base python	Rotina Matlab	Software base c++	custo, praticidade
Possuir sistema de encapsulamento	Carcaça de ABS	Carcaça multi material		custo, desempenho, facilidade de fabricação
Possuir sistema de alimentação	Bateria 9V	4 pilhas AAA 1.5V	Bateria de ion de lítio	capacidade, peso, dimensões, praticidade

Fonte: O autor 2022

Na matriz morfológica também foi adicionado uma coluna para listar os principais requisitos de avaliação de cada produto, esses requisitos mostrados estão diretamente relacionados com os requisitos de cliente e produto obtidos da análise da matriz da casa da qualidade. Para a avaliação e comparação das soluções em relação aos requisitos levantados é utilizado a matriz de avaliação, mostrada na [Figura 29](#) a matriz de avaliação lista as possíveis tecnologias utilizadas para a solução e os requisitos, e para cada relação uma nota de comparação é definida entre -3, que significa que a tecnologia é a mais adequada ao requisito relacionado, até 3, que significa que a tecnologia é a menos adequada ao requisito relacionado.

Figura 29 – Matriz de avaliação

	Custo	Peso	Dimensões	Praticidade	Desempenho	Gasto energético	Facilidade de fabricação	Nota final
Módulo amplificador de sinal LM358	-3	0	3	3	3	0	0	6
Módulo amplificador de sinal HX711	0	0	0	-3	-3	0	0	-6
Modulo ADS1115	0	0	0	-3	-1	0	0	-4
Microprocessador Arduino nano	1	0	-1	0	1	-1	1	1
Microprocessador ESP32	3	0	0	-3	-3	3	-1	-1
Microprocessador ESP8266	1	0	0	-3	-1	1	-1	-3
Modulo de armazenamento em cartão SD	0	0	0	0	0	0	0	0
Transferência de dados via bluetooth (IEEE 802.15.1)	3	0	3	1	0	1	0	8
Transferencia via Wi-fi (IEEE 802.11)	1	0	3	-3	0	1	0	2
Tranferencia via radiofrequênciia	0	0	1	3	-3	3	0	4
Software base python	-3	0	0	-3	0	0	0	-6
Rotina Matlab	3	0	0	3	0	0	0	6
Software base c++	-3	0	0	-1	0	0	0	-4
Carcaça de ABS	-3	-3	0	0	0	0	-1	-7
Carcaça multi material	3	1	0	0	0	0	3	7
Bateria 9V	1	1	3	0	0	0	3	8
4 pilhas AAA 1.5V	0	0	1	-1	0	0	1	1
Bateria de ion de lítio	3	3	3	1	0	0	3	13

Fonte: O autor 2022

A matriz de avaliação resulta em um valor quantitativo que avalia o quanto adequado cada opção tecnológica é ao projeto do dispositivo. Após a análise dos resultados da matriz de avaliação as tecnologias escolhidas são mostradas na [Figura 30](#).

Figura 30 – Soluções escolhidas

SISTEMA	SOLUÇÃO		
AMP DE SINAL	LM358	HX711	ADS1115
PROCESSADOR	Arduino nano	ESP32	ESP8266
ARMAZENAMENTO	cartão SD		
COMUNICAÇÃO	Bluetooth	Wifi	Radiofrequência
SOFTWARE	Python	Matlab	C++
ENCAPSULAMENTO	Carcaça de ABS	Carcaça multi material	
ALIMENTAÇÃO	1 x 9V	4 x AAA 1.5V	Li-ion

Fonte: O autor 2022

Após definido as tecnologias que serão utilizadas no desenvolvimento do produto, deve-se seguir para a etapa de projeto preliminar.

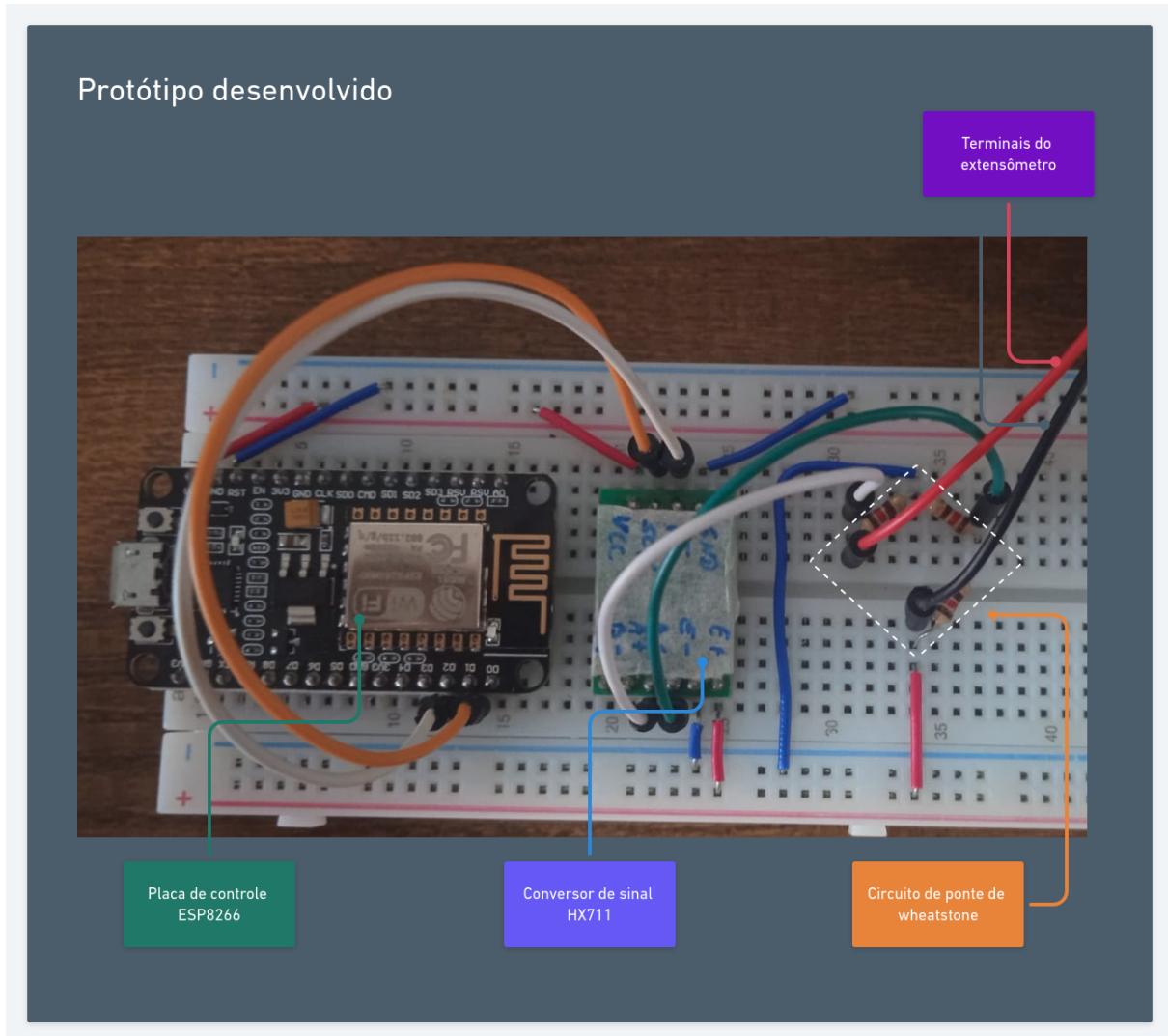
3.4 PROJETO PRELIMINAR

O projeto preliminar é realizado com o objetivo de testar e obter a validação das soluções tecnologias disponíveis escolhidas no projeto conceitual. Nas próximas sub seções são apresentados os protótipos montados e a metodologia dos ensaios experimentais.

3.4.1 Protótipos avaliados

Foram montados e avaliados o funcionamento de dois protótipos do dispositivo, um deles utilizando um controlador ESP8266 e um amplificador de sinal HX711, com a utilização de uma célula de carga de 1kg para serem executados testes na placa controladora e no amplificador de sinal. O primeiro protótipo é mostrado na [Figura 31](#).

Figura 31 – Protótipo preparado para a realização dos experimentos



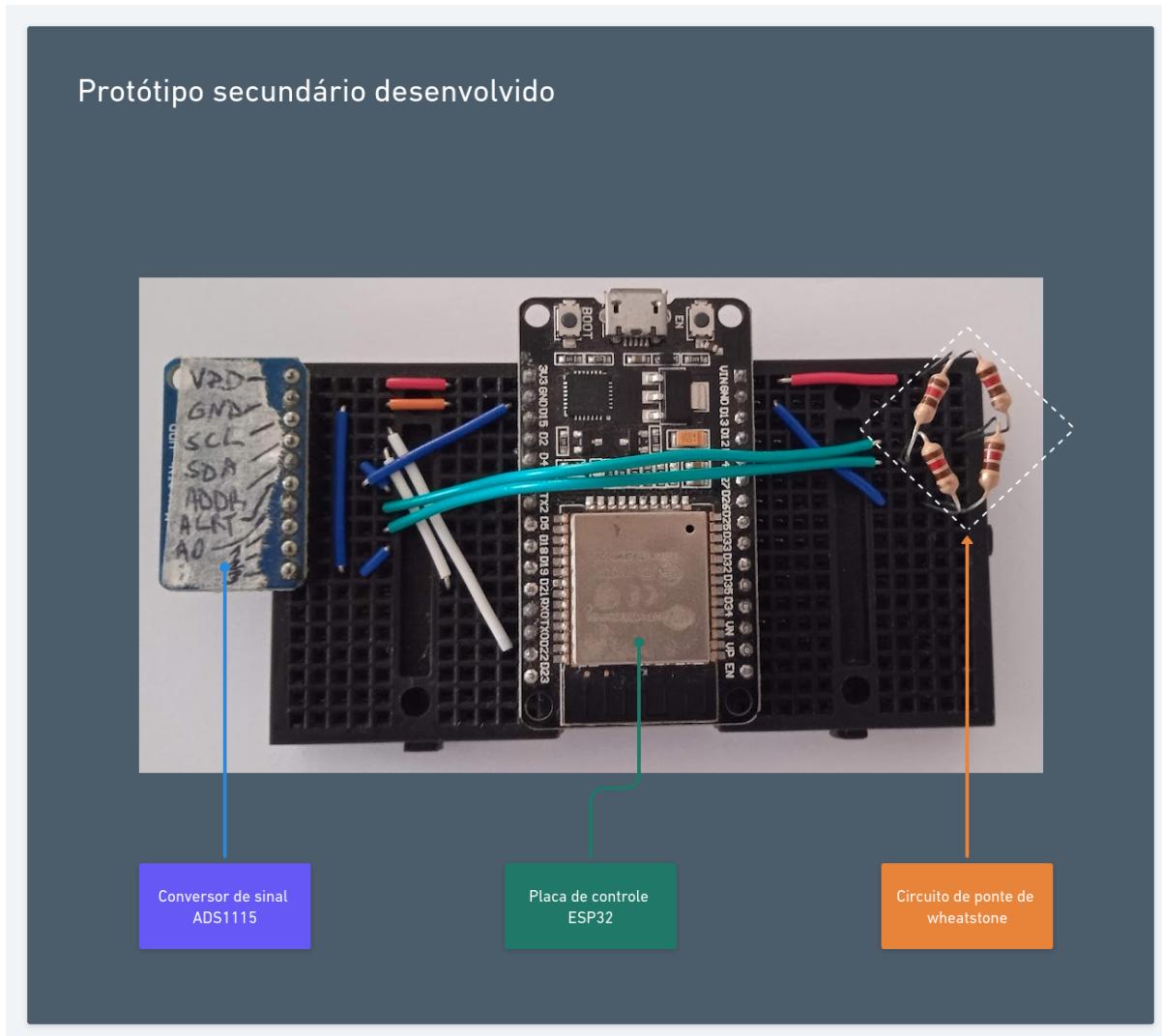
Fonte: O autor 2022

Esta versão foi desenvolvida seguindo os resultados de componentes do projeto conceitual, porém, com sua utilização não foi possível realizar os testes experimentais com sucesso, pois o amplificador de sinal não se mostrou capaz de obter os dados de tensão da ponte de wheatstone no experimento de flexão. O motivo identificado do problema era o de que a tensão da ponte estava maior do que a tensão que pode ser medida pelo módulo HX711. A tensão da ponte obtida por um multímetro digital foi de $59mV$ e o módulo de conversão de sinal consegue ler tensões de no máximo $40mV$.

Com o objetivo de poder se obter os resultados experimentais foi utilizado uma versão prévia do protótipo, que utiliza o controlador ESP32 e um amplificador de sinal ADS1115, o experimento utilizando esse protótipo foi considerado válido uma vez que os princípios de funcionamento dos controladores ESP8266 e ESP32, e dos amplificadores de sinal HX711 e ADS1115 são semelhantes. O segundo protótipo desenvolvido

é mostrado na [Figura 32](#).

Figura 32 – Segundo protótipo preparado para a realização dos experimentos



Fonte: O autor 2022

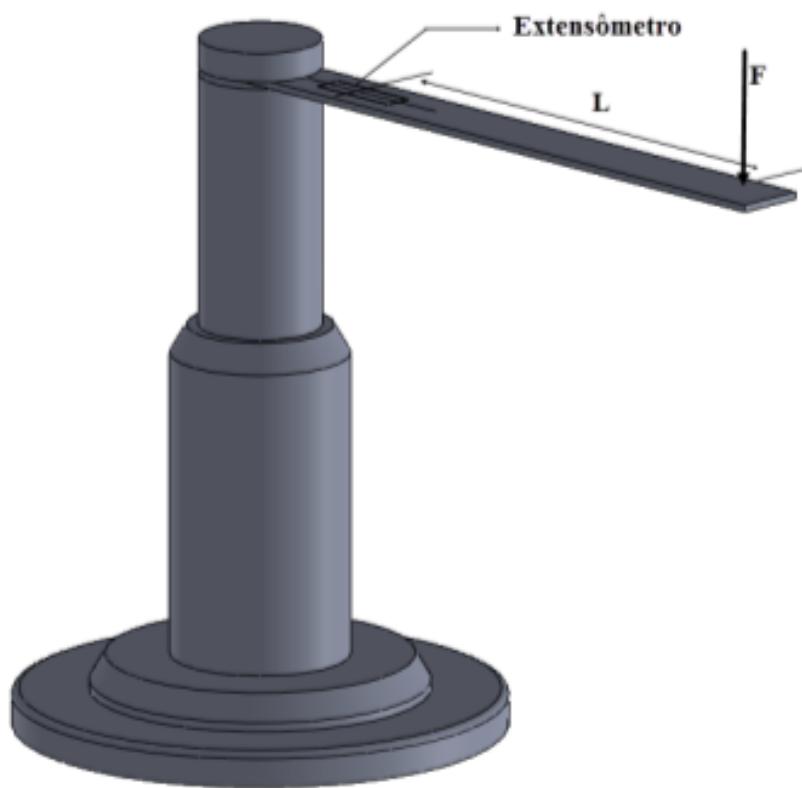
A metodologia de execução do experimento para validar o funcionamento do protótipo desenvolvido segue a mesma metodologia do experimento realizado no trabalho de conclusão de curso de Minela, uma introdução aos principais tópicos dessa metodologia e eventuais diferenças entre os dispositivos utilizados nos dois trabalhos para cada tópico é feita nas próximas sub seções.

3.4.2 Dispositivo para ensaio de flexão

O dispositivo para realizar o ensaio de flexão é composto por uma viga de seção retangular de 20mm de largura por 2mm de espessura, que mede 200mm de comprimento e é de uma liga desconhecida de alumínio, e uma base projetada e fabricada

em aço 1020 para fixar a viga em uma situação de engaste na viga ([MINELA, 2017](#)). A figura [Figura 33](#) mostra o projeto do dispositivo desenvolvido por Minela.

Figura 33 – Dispositivo de ensaio de flexão



Fonte: ([MINELA, 2017](#))

Na viga é colado um extensômetro unidimensional para obter os dados de deformação, as propriedades do extensômetro utilizado são mostradas na [Tabela 5](#).

Tabela 5 – Propriedades do extensômetro colado ao dispositivo de flexão

Marca	Micro Measurements ®
Tipo de extensômetro	EA-06-250AF-120
Resistência Elétrica	$120 \pm 0.15\%\Omega$
Factor de gage até $75^{\circ}F$	$2.025 \pm 0.5\%$
Comprimento	6.35
Limite de temperatura	-75°C á 175°C para medições estáticas

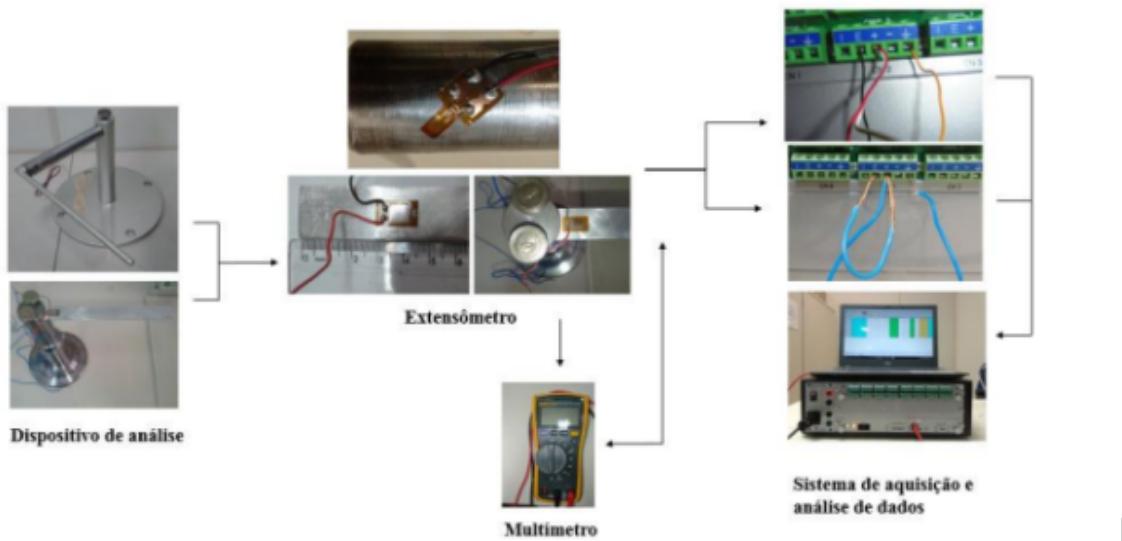
Fonte: Adapdato de ([MINELA, 2017](#))

As cargas são aplicadas na extremidade livre da viga a distância de 150mm entre o centro do extensômetro e o ponto de aplicação da carga. Com a finalidade de se obter os valores de deformação causados pela aplicação de cada carga, cada trabalho utiliza-se de um sistema de medição diferente, apresentado na seção seguinte.

3.4.3 Sistemas de medição

Tanto o sistema de medição utilizado por Minela (2017), mostrado na [Figura 34](#), quanto o utilizado para o desenvolvimento deste trabalho seguem o mesmo princípio de funcionamento.

Figura 34 – Sistema de medição utilizado por ([MINELA, 2017](#))



Fonte: ([MINELA, 2017](#))

O sistema de medição utilizado por Minela (2017) é composto por um dispositivo de obtenção de dados ADS2002, que é mostrado na [Figura 35](#), desenvolvido e fabricado pela LYNX Tecnologia, que é conectado a um computador. O dispositivo ADS2002 obtém os dados gerados pelo sensor e os envia ao computador via conexão ethernet. O computador utiliza o software AQDados para conexão com o ADS2002, calibração e aferição dos extensômetros, e o software AqAnalysis para fazer o processamento dos sinais e gerar relatórios de análise, ambos os programas são desenvolvidos pela fabricante do dispositivo de obtenção de dados.

A conexão entre o dispositivo de obtenção de dados e o extensômetro ocorre utilizando os terminais elétricos do canal específico de análise, o ADS2002 já possui, integrado em si, os componentes elétricos do circuito da ponte de wheatstone para a instrumentação do sinal. A calibração do extensômetro afim dos resultados serem mos-

Figura 35 – Sistema de medição utilizando o LINX ADS2002



Fonte: (MINELA, 2017)

trados como valores de forma, ao invés de tensões, é feita utilizando a [Equação \(15\)](#) que define um valor de fator de engenharia em função do fator de sensibilidade do extensômetro k , da resistência média do extensômetro RM e da resistência de calibração RC que é disponibilizada pelo fabricante.

$$VE = \left(\frac{1}{k} \left(\frac{RM}{RM+RC} \right) \right) \quad (15)$$

O sistema de medição utilizando o protótipo desenvolvido pelo autor é feito pela conexão entre o controlador ESP32 e o computador. Para isso é utilizado um software desenvolvido pelo autor utilizando a linguagem de programação Python para realizar a transferência dos dados obtidos pelo controlador em tempo real. A [Figura 36](#) mostra o protótipo desenvolvido sendo utilizado com o dispositivo de flexão.

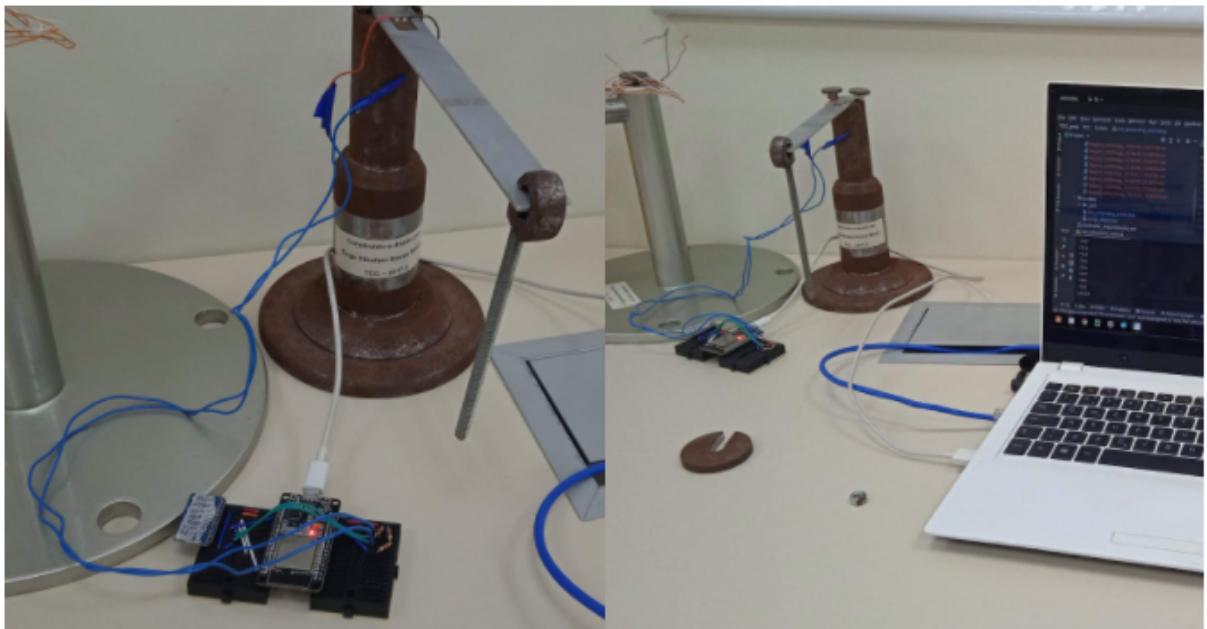
A calibração do dispositivo é feita utilizando uma equação de interpolação linear, com o objetivo de converter os valores discretos obtidos em bits pelo amplificador de sinal para um valor de gradeza física desejado. Uma equação linear genérica é mostrada na [Equação \(16\)](#).

$$f(D) = fa * D + fb \quad (16)$$

Os fatores de calibração a e b , mostrados nas [Equação \(17\)](#) e [Equação \(18\)](#), da equação linear são encontrados utilizando os valores nominais, e os valores obtidos dos sinais pela utilização de duas cargas distintas conhecidas.

$$fa = \frac{NV_{high} - NV_{low}}{D_{high} - D_{low}} \quad (17)$$

Figura 36 – Protótipo do dispositivo desenvolvido conectado com o extensômetro no dispositivo de flexão



Fonte: O autor 2021

$$fb = NV_{low} + D_{low} \frac{NV_{high} - NV_{low}}{D_{high} - D_{low}} \quad (18)$$

A calibração ocorre por um método automatizado implementado no software de comunicação entre o controlador e o computador. Após calibrado, os dados são mostrados como os valores de grandeza física calibrada.

3.4.4 Cargas aplicadas

Minela utiliza pesos com massas pré definidas apoiadas utilizando um fuso de fixação para aplicação das cargas no ponto “F” no dispositivo, mostrado na [Figura 33](#). Dentre as massas utilizadas por Minela duas não foram localizadas pelo autor deste trabalho. Com a finalidade de poder se obter resultados que se possam fazer comparações diretas entre os trabalhos as massas não encontradas foram substituídas por massas semelhantes.

Todos os valores de massa dos pesos utilizados foram obtidos novamente pelo autor utilizando o valor médio de três leituras obtidas por uma balança de precisão disponibilizada pelo laboratório de metrologia da UFSC Joinville. Os valores obtidos são apresentados na [Tabela 6](#).

Tabela 6 – Valores de massas utilizadas para aplicação das cargas nos dispositivos de flexão e torção

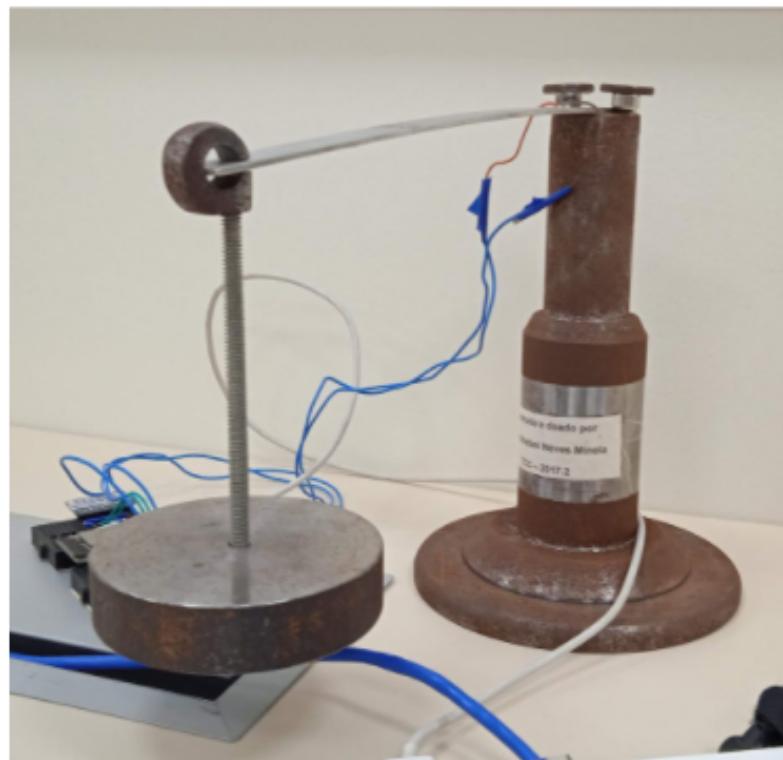
Item	Massa obtida	Massa (MINELA, 2017)	Variação
Porca	3,06 g	14,98 g	78,84 %
Fuso	48,63 g	48,78 g	0,31 %
Peso 1	86,73 g	99,68 g	12,99 %
Peso 2	198,38 g	198,36 g	0,01 %
Peso 3	997,13 g	997,30 g	0,02 %
Peso 4	497,66 g	497,69 g	0,02 %

Fonte: O autor 2022

As massas da porca e do “peso 1” utilizados por Minela variam de forma considerável em relação aos pesos utilizados neste trabalho, então para todas as comparações diretas de resultados experimentais obtidos entre os dois trabalhos deve ser aplicados fatores de correção de 11.42g para a porca e 12.95g para o “peso 1”.

O método de aplicação de cargas é caracterizado pela aplicação na extremidade livre da viga das massas utilizando o fuso como suporte, a [Figura 37](#) mostra a viga de alumínio defletida pela aplicação da carga do “peso 3”.

Figura 37 – Aplicação do 'peso 3' no dispositivo de flexão



Fonte: O autor 2021

Na extremidade da viga encontra-se uma demarcação para auxiliar o posicionamento do apoio do fuso e as cargas são aplicadas de maneira cuidadosa de modo que não sejam geradas forças de impulso na viga. O sistema de medição obtêm valores em bits proporcionais a carga aplicada no experimento.

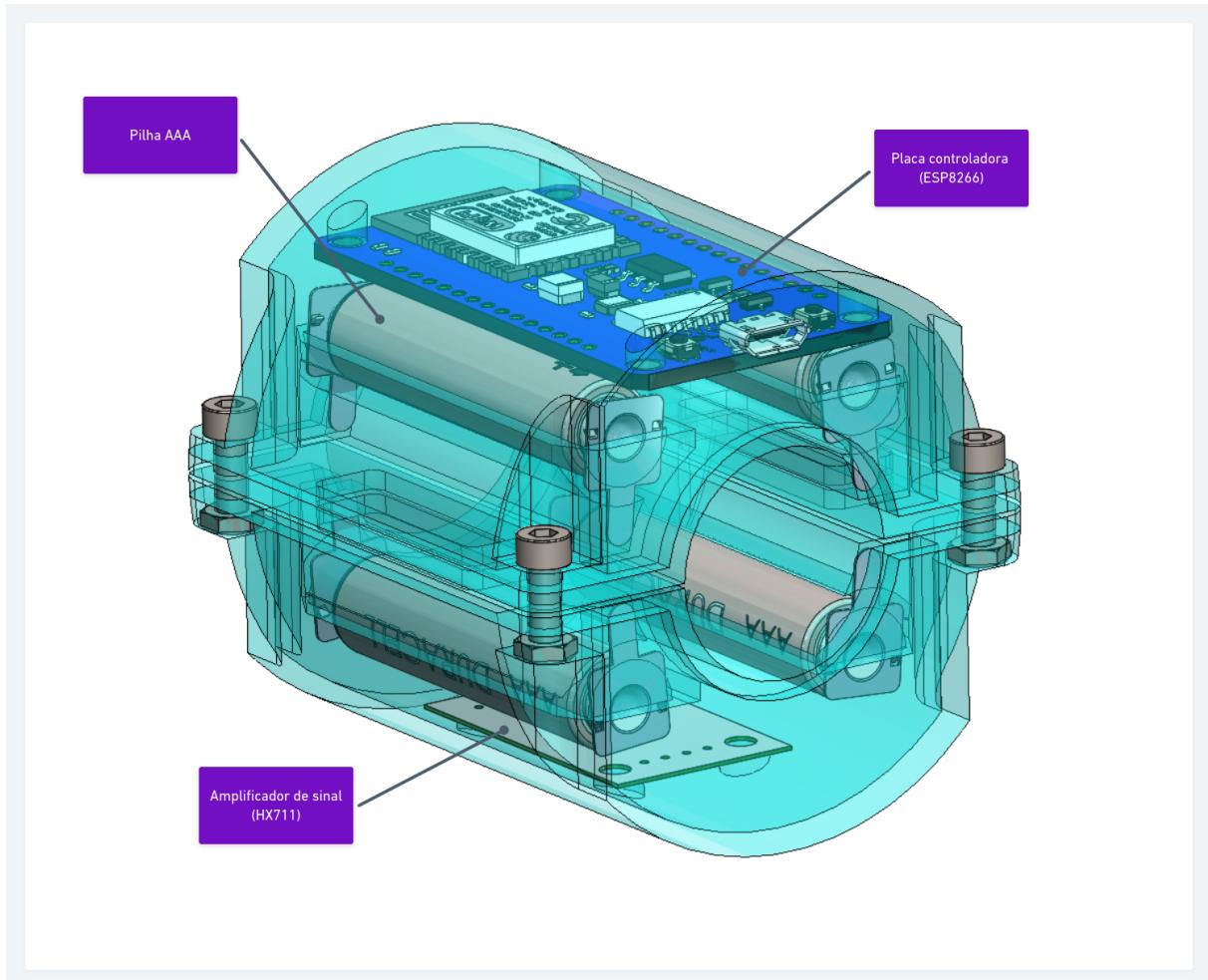
A etapa de análise dos resultados obtidos pelo experimento com o protótipo são apresentados no [Capítulo 4](#).

3.5 PROJETO DETALHADO

A documentação do projeto detalhado do produto é composta pelos projetos mecânico, elétrico/eletônico e pelo desenvolvimento do software de comunicação.

O projeto mecânico do dispositivo foi desenvolvido utilizando o software Solidworks 2017, os modelos da placa de controle ESP8266 e do amplificador de sinal HX711 foram obtidos na plataforma de compartilhamento de modelos GrabCAD. Após ser definido um arranjo inicial da posição dos componentes no dispositivo foi modelado um componente de encapsulamento para o dispositivo. O modelo da montagem do dispositivo é ilustrado na [Figura 38](#).

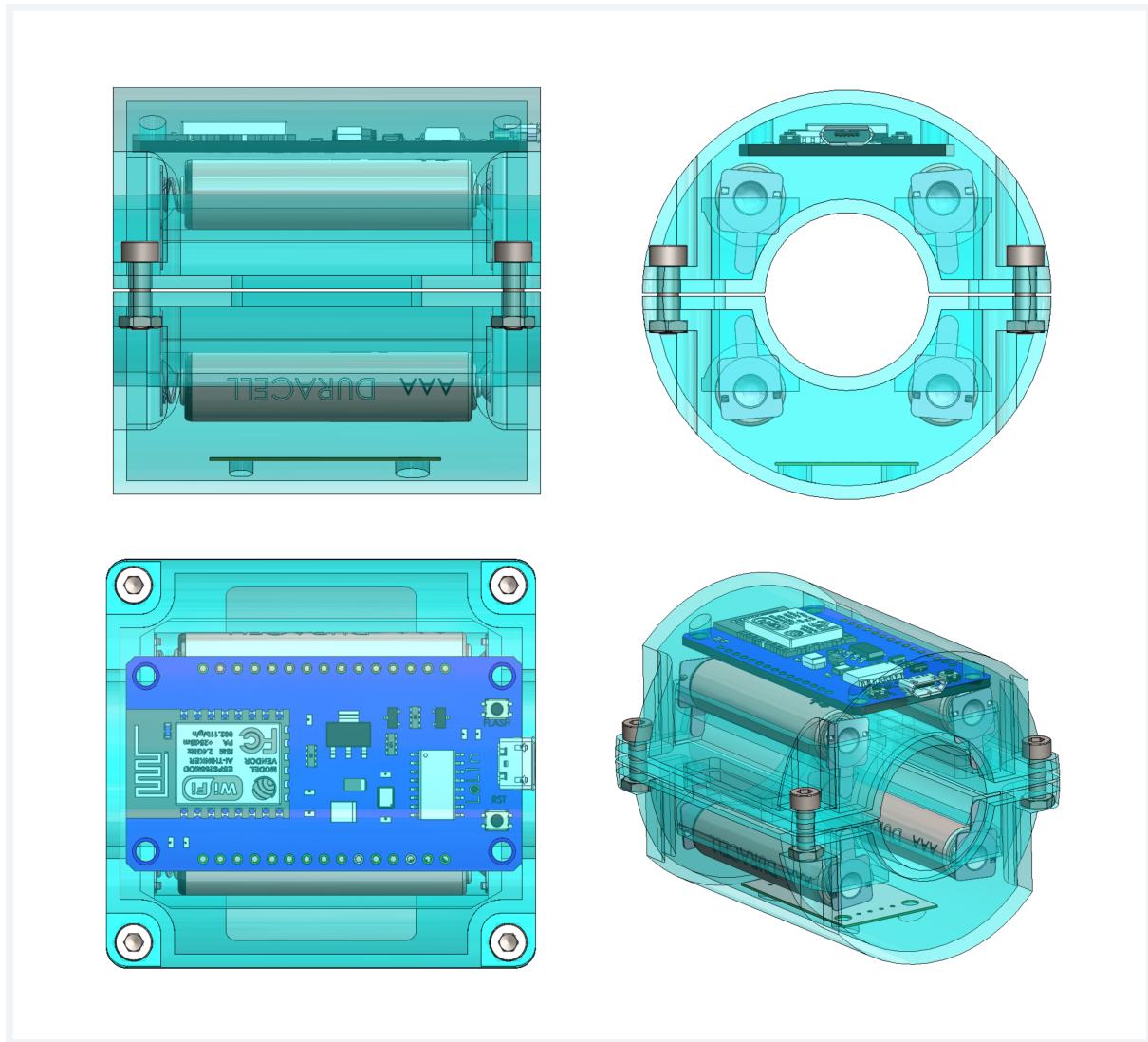
Figura 38 – Modelagem da montagem do dispositivo



Fonte: O autor 2022

A ilustração do projeto do dispositivo nas três vistas padrão e vista isométrica é mostrado na [Figura 39](#).

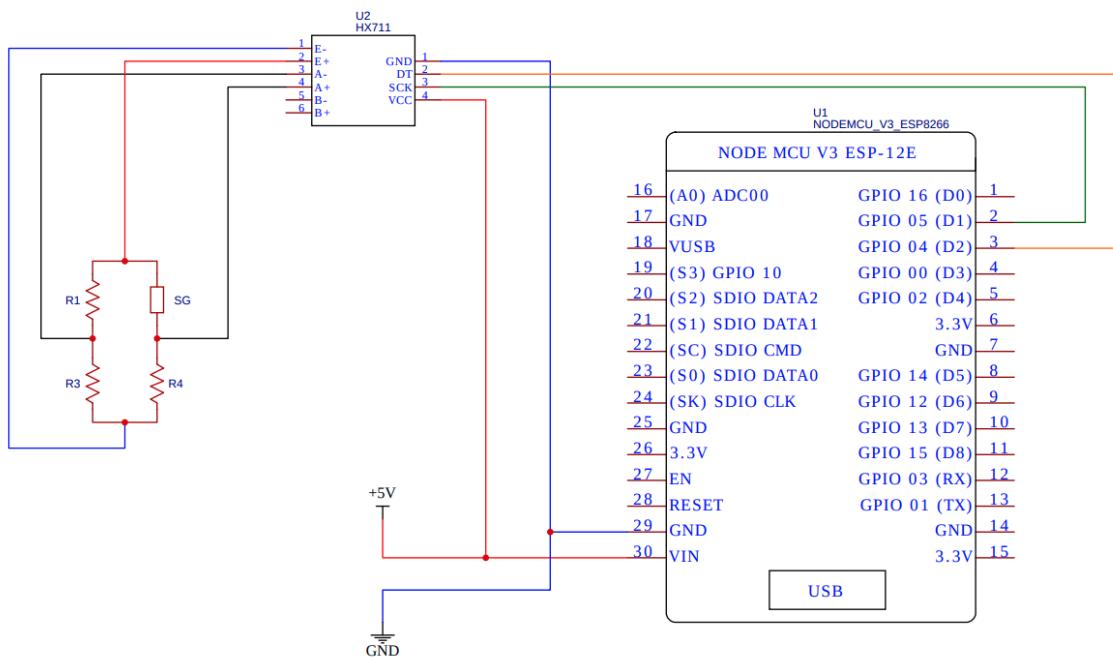
Figura 39 – Desenho em vistas padrões (primeiro diedro)



Fonte: O autor 2022

O projeto elétrico do dispositivo foi desenvolvido utilizando o software para desenvolvimento de placas eletrônicas EasyEDA e é mostrado na [Figura 40](#) e no [Apêndice B](#).

Figura 40 – Projeto elétrico do dispositivo



Fonte: O autor 2022

A fase de desenvolvimento do software engloba duas etapas principais, a primeira é o desenvolvimento da programação da placa de controle, que é feita utilizando o programa Arduino IDE para conectar e programar o controlador da plataforma. Uma introdução a estrutura do programa de controle e das suas funções é mostrada na Figura 41

Figura 41 – Esquema da programação do dispositivo



Fonte: O autor 2022

A programação da placa de controle é feita com uma linguagem de programação baseada em C++, com funções específicas para a programação de controladores de plataformas abertas, como o Arduino e o ESP8266.

A função handleRead utiliza o método hx711.read(), conforme o [Código 1](#), para obter os valores de tensão na saída da ponte de wheatstone e os enviar ao computador via rede local. O programa completo do controlador é apresentado no [Apêndice C](#).

Código 1 – Função de obtenção de sinal pelo amplificador HX711

```

1
2 void handleRead() {
3     if (server.method() != HTTP_POST) {
4         server.send(405, "text/plain", "Method not allowed");
5     } else {
6         server.send(200, "text/plain", String(hx711.read()) +

```

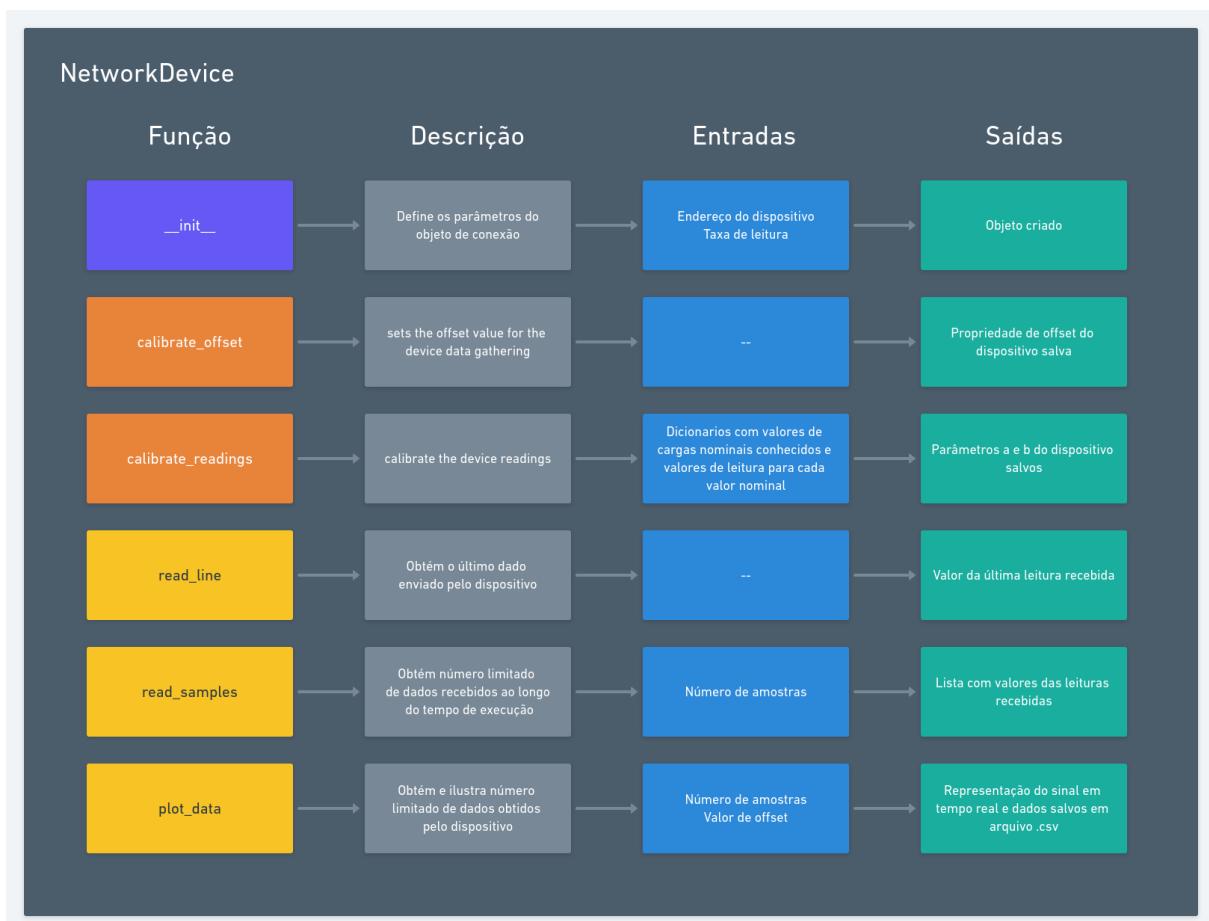
```

server.arg("plain"));

7 }
8 }
```

Uma vez configurado o controlador do dispositivo, foi desenvolvido utilizando a linguagem Python um objeto computacional para facilitar a conexão e utilização dos dados originados pelo dispositivo. O objeto e suas funções é ilustrado pela [Figura 42](#).

Figura 42 – Objeto NetworkDevice



Fonte: O autor 2022

As funções de base do objeto são mostradas na [Código 2](#). O método `__init__` - recebe e salva como parâmetros do objeto os dados de endereço de ip do dispositivo e intervalo de leitura inseridos, e o método `read_line` utiliza a função `post` do pacote `requests` para enviar uma requisição ao endereço de ip do objeto e retorna o valor obtido em forma de texto de maneira calibrada, caso o argumento `calibrated` seja igual a verdadeiro, ou não calibrado, caso contrário.

Código 2 – Métodos base do objeto NetworkDevice

```
2 """
3 Creates a local network connection device object
4 """
5
6 def __init__(self, ip, delay_time):
7     self.url = f'http://[{ip}]/read'
8     self.delay_time = delay_time
9     self.offset = 0
10    self.a = 1
11    self.b = 0
12
13 def read_line(self, calibrated: bool = False):
14     """returns the last line of data sent by the device"""
15     read = int(post(self.url).text) - self.offset
16     if calibrated:
17         return self.a * read + self.b
18     else:
19         return read
```

Caso seja necessária a obtenção de dados em sequência ao longo do tempo foram desenvolvidas as funções `read_samples` e `plot`, mostradas na [Código 3](#), o número de amostras é passado para a obtenção repetida dos dados, utilizando o parâmetro de intervalo de leitura para determinar o intervalo de execução da chamada do método `read_line`, e é retornado um objeto de lista do Numpy com os dados obtidos.

Código 3 – Métodos para executar experimentos do objeto NetworkDevice

```
1
2 def read_samples(self, n_of_samples: int, plot: bool = False,
3                  calibrated: bool = False):
4     """returns a number of data lines given a sample size"""
5
6     if not plot:
7         value_list = array([])
8         while len(value_list) < n_of_samples:
9             value_list = append(
10                 value_list,
11                 int(self.read_line(calibrated=calibrated)))
12             sleep(self.delay_time)
13
14     else:
15         value_list = self.plot_data(n_of_samples=n_of_samples,
```

```
    calibrated=calibrated)
16
17     return value_list
18
19 def plot_data(self, n_of_samples: int, calibrated: bool = False):
20     """plot the numerical data received"""
21     value_list = array([])
22
23     plt.ion()
24     fig, axs = plt.subplots(1)
25     fig.suptitle('Readings')
26
27     while len(value_list) < n_of_samples:
28         try:
29             value_list = append(value_list,
30                                 int(self.read_line(calibrated=calibrated)))
31
32             axs.cla()
33             axs.plot(value_list[-25:])
34
35             plt.pause(self.delay_time)
36
37         except:
38             print("error!")
39
40     plt.close()
41
42     return value_list
```

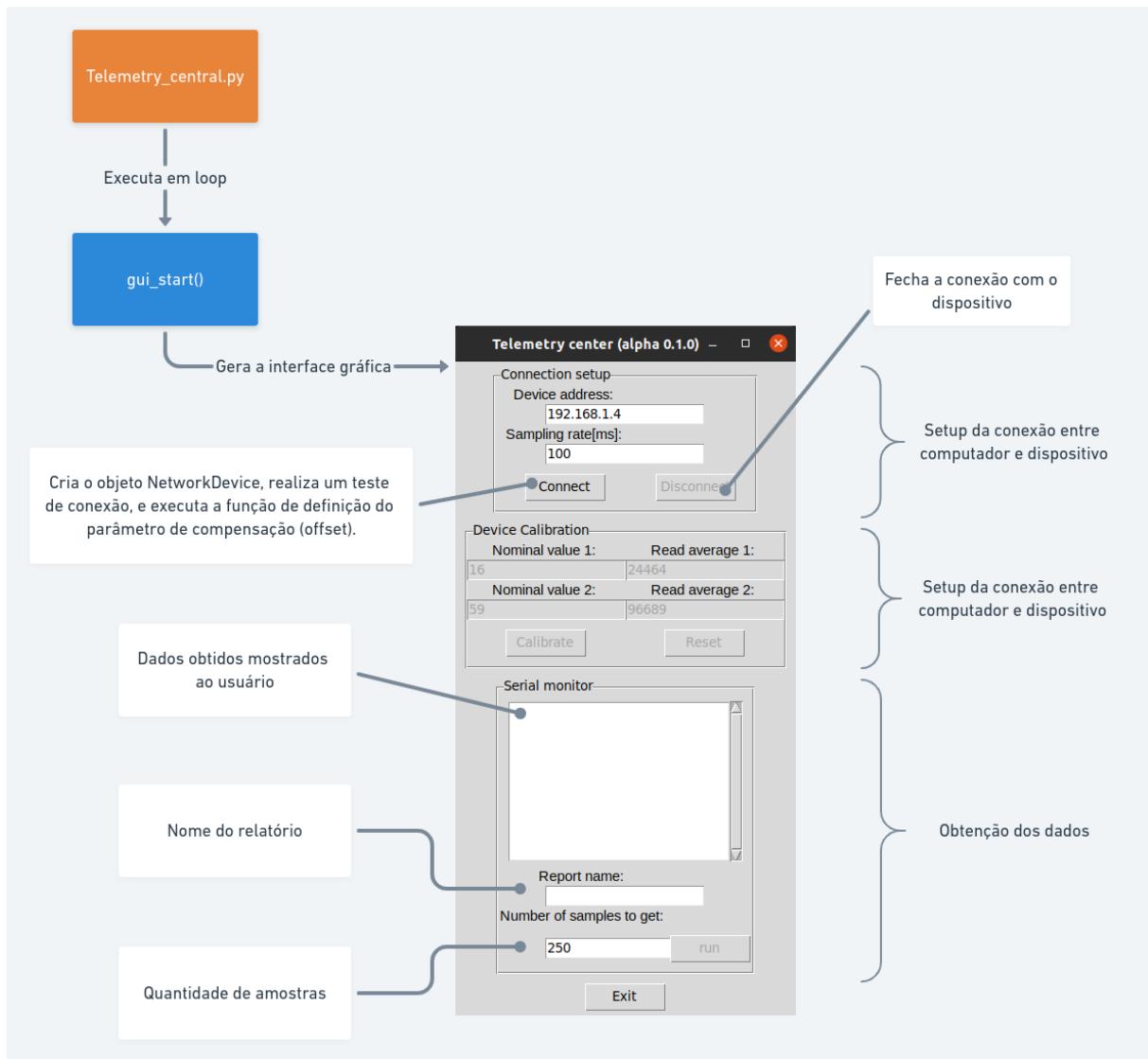
As funções de calibração do objeto de conexão com o dispositivo são mostradas no [Código 4](#). O método `calibrate_offset` serve para definir o ponto de leitura quando nenhuma carga está presente, e funciona obtendo 40 amostras utilizando o método `read_samples`, arredondando o valor médio dessas amostras a um número inteiro e definindo o parâmetro `offset` do objeto ao valor obtido. A função `calibrate_readings` utiliza duas cargas nominais conhecidas e seus sinais obtidos em forma de dicionário e utiliza estes valores para definir os parâmetros `a` e `b` da função linear de calibração, com a finalidade de ser utilizada no método `read_line` para converter os valores em forma de bits para um formato de valor nominal da grandeza física calibrada.

Código 4 – Métodos de calibração do objeto `NetworkDevice`

```
2 def calibrate_offset(self):
3     """sets the offset value for the device data gathering"""
4     self.offset = 0
5     self.offset = round(self.read_samples(n_of_samples=40).mean())
6
7 def calibrate_readings(self, calibration_dict_1: dict,
8                       calibration_dict_2: dict):
9     """calibrate the device readings"""
10    w1 = calibration_dict_1['nominal_value']
11    w2 = calibration_dict_2['nominal_value']
12    r1 = round(calibration_dict_1['signal'].mean())
13    r2 = round(calibration_dict_1['signal'].mean())
14
15    self.b = w2 / ((r2 / r1) * (w1 - 1) + 1)
16    self.a = (w1 - self.b) / r1
```

Com o intuito de facilitar a utilização do método pelo usuário é desenvolvido uma interface gráfica simples, uma breve apresentação da interface desenvolvida utilizando o pacote tkinter é mostrada na Figura 43.

Figura 43 – Interface gráfica



Fonte: O autor 2022

Os códigos completos para o objeto NetworkDevice e para a geração da interface gráfica são apresentados no [Apêndice D](#).

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os sinais e valores obtidos no experimento realizado no dispositivo de flexão. Os tópicos aqui analisados apresentam a comparação dos resultados obtidos pelo experimento realizado pelo autor com os valores obtidos pelo estudo de caso feito por Minela (2017).

O objetivo primário da comparação dos resultados é o de se obter dados descritivos de performance do dispositivo desenvolvido em relação a um sistema de medição industrial homologado, no final do capítulo são indicados as situações de melhor performance do protótipo.

4.1 SINAIS OBTIDOS

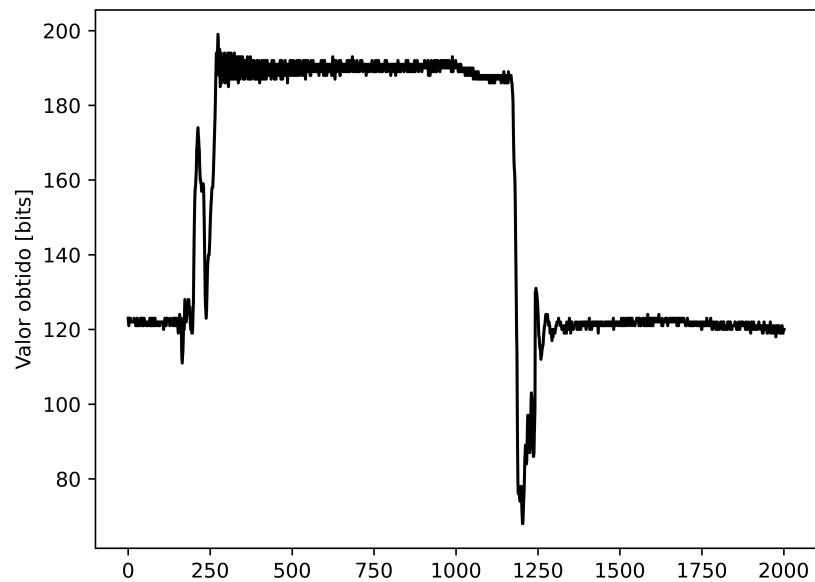
Os sinais captados pelo sistema de medição desenvolvido seguem um formato trapezoidal, onde as zonas iniciais e finais representam os momentos em que a viga não se encontrava sob a aplicação da carga, e a zona intermediária representa a total aplicação da carga no dispositivo.

4.1.1 Sinais de calibração

A primeira etapa da utilização do dispositivo é definir os sinais de calibração, para isso é obtido as respostas de leitura do amplificador de sinal para a aplicação das cargas de 0,138kg e 1,04kg, que representavam o menor e o maior peso disponível para o experimento, sem considerar as combinações.

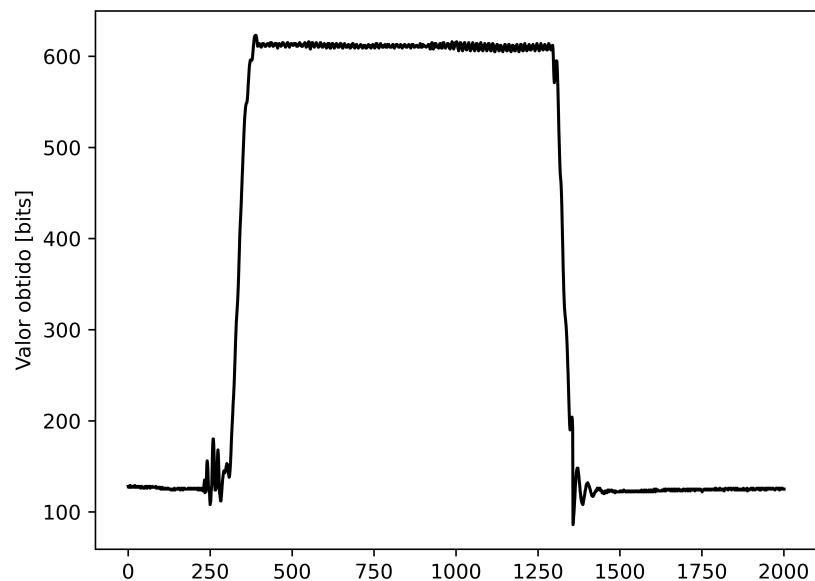
Foi obtido o valor médio de 190 bits na zona superior do sinal trapezoidal na aplicação da massa de 0,138kg, como mostrado na [Figura 59](#). Para a aplicação da massa de 1.04kg foi obtido o valor de 612 bits, mostrado na [Figura 45](#).

Figura 44 – Sinal obtido pela aplicação da carga de 0,138kg no dispositivo



Fonte: O autor 2022

Figura 45 – Sinal obtido pela aplicação da carga de 1,04kg no dispositivo



Fonte: O autor 2022

Uma vez obtidos os valores em bits para cada ponto de calibração e conhecidos os seus valores de deformação teóricos, é calculado os fatores a e b da função de interpolação linear que converte valores obtidos pelo amplificador de sinal em bits para valores equivalentes de deformação no extensômetro. O valor do fator a encontrado foi de $2.8881\mu m/bit$ e o de b foi de $-363.4311\mu m$.

Uma vez definidos os parâmetros de calibração são feitos os experimentos aplicando a carga de cada peso no dispositivo de flexão. Alguns dos sinais obtidos e uma discussão geral sobre eles são discutidos nas seções a seguir.

4.1.2 Sinais calibrados obtidos

O experimento é realizado obtendo os sinais calibrados obtidos pelo dispositivo na aplicação de cada uma das massas disponíveis e pela aplicação de combinações entre essas massas, os valores de cargas aplicadas para a realização dos experimentos são mostradas na [Tabela 7](#).

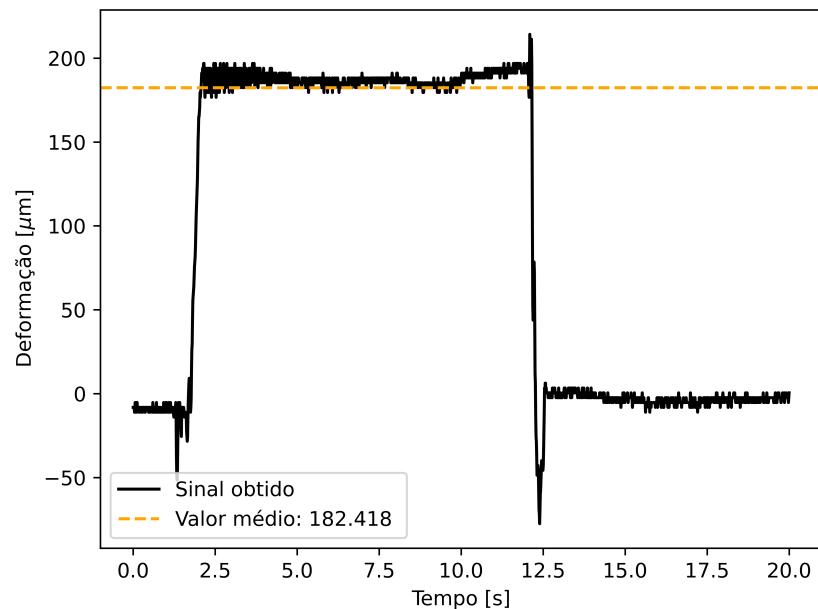
Tabela 7 – Cargas aplicadas para os experimentos

Pesos aplicados	Massa aplicada (Considerando fuso e porca)
Peso 1	138.42
Peso 2	250.07
Peso 3	1048.82
Peso a	549.35
Pesos 1 e 2	336.8
Pesos 1 e a	636.08
Pesos 2 e a	747.73
Pesos 1, 2 e a	834.46
Pesos 3 e 1	1135.55
Pesos 3 e 2	1247.2
Pesos 3, 2 e 1	1333.93

Fonte: O autor 2022

O primeiro peso aplicado é o de menor massa disponível, que já tinha sido previamente utilizada para utilização na calibração do dispositivo, o sinal obtido é mostrado na [Figura 50](#), o valor de deformação obtido foi de $182.42\mu m$.

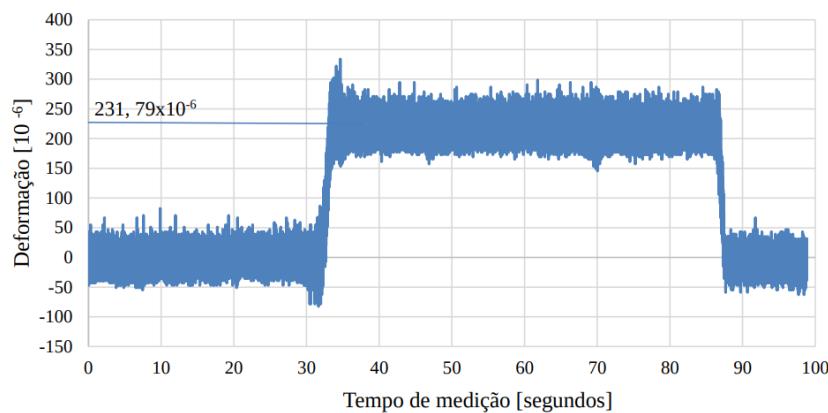
Figura 46 – Sinal obtido da aplicação de 0,138 kg de carga aplicada no dispositivo



Fonte: O autor 2022

O sinal equivalente obtido por Minela (2017) é mostrado na [Figura 47](#).

Figura 47 – Sinal obtido da aplicação da massa ded 0,163 kg de carga aplicada no dispositivo



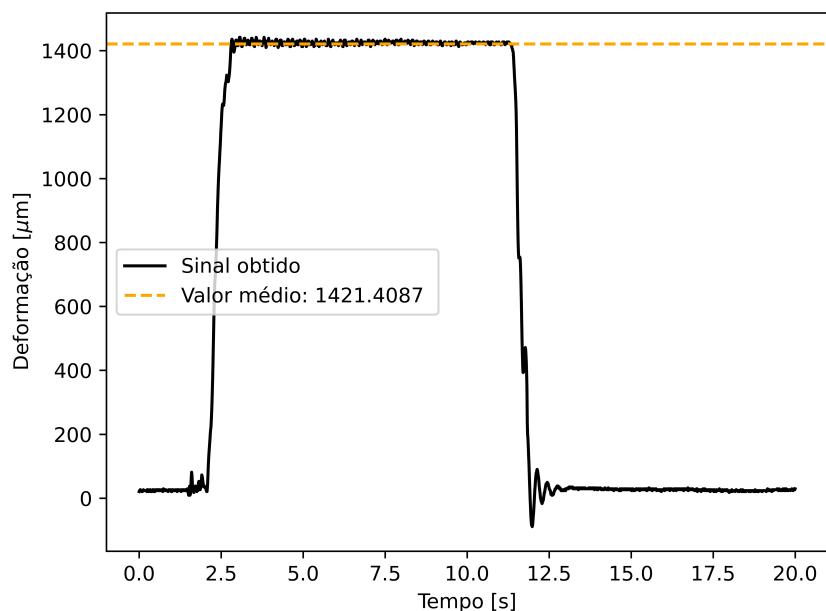
Fonte: ([MINELA, 2017](#))

Uma comparação direta de valor não pode ser feita considerando os dois sinais, uma vez que as massas aplicadas não foram as mesmas, porém, pode-se notar que o efeito dos ruídos no dispositivo desenvolvido é consideravelmente menor do que

os obtidos pelo dispositivo utilizado em Minela (2017). A atuação dos filtros de passa-altas do módulo de conversão de sinal utilizado no dispositivo desenvolvido pode ser o principal motivo pelos quais os ruídos em todos os resultados obtidos pela utilização do protótipo desenvolvido se mostraram de baixas amplitudes.

O sinal obtido pela aplicação de 1,04kg é mostrado na [Figura 57](#), o valor de deformação obtido foi de $1421.41\mu m$.

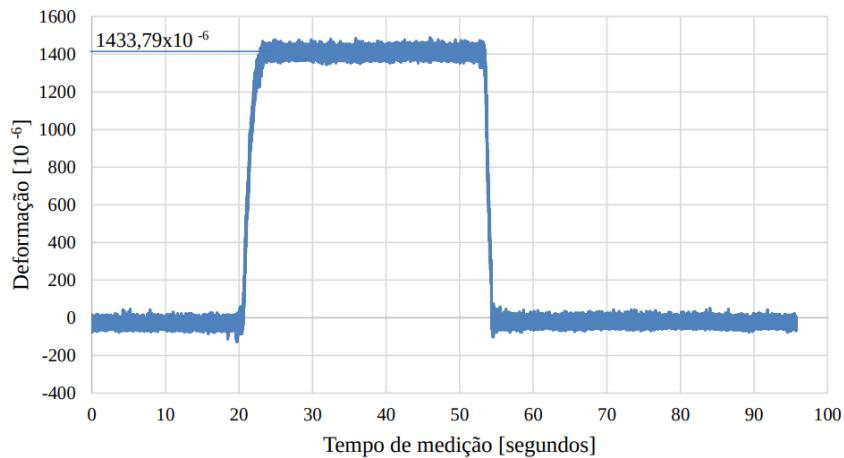
Figura 48 – Sinal obtido da aplicação de 1,040 kg de carga aplicada no dispositivo



Fonte: O autor 2022

O sinal equivalente obtido por Minela (2017) é mostrado na [Figura 49](#)

Figura 49 – Sinal obtido da aplicação da massa ded 0,163 kg de carga aplicada no dispositivo



Fonte: (MINELA, 2017)

Assim como no primeiro sinal, nota-se que os sinais são semelhantes, com a excessão dos ruídos, que são mais impactantes com a utilização do dispositivo utilizado por Minela (2017) do que com a utilização do protótipo desenvolvido.

Os sinais obtidos para carga utilizada no experimento podem ser encontrados no [Apêndice E](#).

Utilizando a [Equação \(7\)](#) pode-se obter analiticamente valores de deformação esperados para cada situação de carga do experimento. O valor de módulo de elasticidade utilizado no modelo analítico foi de 85.19GPa , que é um valor obtido experimentalmente no trabalho de Minela (2017) para o mesmo dispositivo utilizado. A [Tabela 8](#) mostra os resultados de valores de deformação obtidos para cada experimento, os valores de deformação esperados calculados e os valores de erro de cada resultado obtido em relação ao teórico.

Tabela 8 – Cargas aplicadas para os experimentos

Fonte: O autor 2022

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral do trabalho foi considerado como alcançado, uma vez que foi desenvolvido com sucesso um protótipo funcional. Por mais que não foi possível a sua aplicação em um eixo rotacional, o seu conceito de funcionamento foi validado por um experimento estático.

O objetivos específico de desenvolver um protótipo focado na utilização por um público alvo foi parcialmente alcançado. As etapas e as decisões das fases da metodologia de projeto foram tomadas considerando os requisitos dos clientes, porém não foi possível validar um dos componentes essenciais do funcionamento do dispositivo na etapa de experimentação, os testes foram realizados utilizando um módulo de conversão de sinal diferentes do definido no projeto conceitual.

As documentações necessárias para replicar o dispositivo se encontram nos [Apêndice B](#), [Apêndice C](#) e [Apêndice D](#). Porém o projeto detalhado, principalmente o projeto mecânico ainda pode ser consideravelmente melhorado adicionando com maior detalhe os encaixes para os componentes de alimentação e os encaixes dos módulos no encapsulamento do dispositivo.

Os valores obtidos pelo experimento se mostraram com erros aceitáveis para aplicações de baixo custo, principalmente quando comparados com os valores obtidos por um dispositivo homologado. Logo a precisão do dispositivo foi considerada como aceitável para a utilização por equipes de competição, uma vez que atualmente é observado a dificuldade pela obtenção desses tipos de dados. O dados obtidos pelo dispositivo ainda podem apresentar melhores valores de precisão e faixa de leitura, é sugerida a implementação de um método de zerar a tensão inicial da ponte de Wheatstone utilizando um elemento de resistência variável que pode ser ajustado pelo usuário, como um resistor trimpot.

Também deve-se apontar que em uma utilização por uma equipe de competição, esta provavelmente já estará utilizando dispositivos para obtenção de dados de sensor, logo, o dispositivo deve transmitir dados em um formato que possa ser obtido por estes elementos centrais de obtenção de dados. O software de obtenção de dados desenvolvido pode ser facilmente modificado e expandido para a representação de diferentes tipos de dados, logo, sua aplicação excede apenas ao dispositivo desenvolvido.

O Método de obtenção de dados via rede de internet faz com que o dispositivo possa ser utilizado para aplicações remotas, como em aplicações de telemetria industrial, porém deve-se notar as limitações em relação a precisão dos dados obtidos.

O preço final encontrado do dispositivo se mostra consideravelmente menor do que os dos dispositivos encontrados no mercado, porém, deve-se notar que os módulos utilizados são desenvolvidos para aplicações específicas e normalmente utilizados por entusiastas em pequenos projetos, logo, não se pode confirmar a confiabilidade e

precisão ao longo do tempo, assim como a durabilidade de um dispositivo fabricado.

5.0.1 Trabalhos futuros sugeridos

Algumas melhorias, implementações e sugestões de experimentos futuros do dispositivo desenvolvido neste trabalho é apresentado na listagem a seguir:

- a) Utilizar o dispositivo para obter os dados em uma aplicação veicular
- b) Estudar o efeito do desbalanceamento de massa do dispositivo no eixo em que está acoplado
- c) Estudar o impacto da utilização de diferentes elementos extensômetros na obtenção do sinal pelo dispositivo
- d) Realizar o experimento utilizando uma ponte de Wheatstone composta unicamente por extensômetros
- e) Realizar o experimento utilizando o dispositivo de torção desenvolvido por Minela (2017)
- f) Obter os valores de deformação de um eixo utilizando primariamente os valores de tensão obtidos utilizando uma função de transferência
- g) Estudar efeitos de atraso na transmissão dos sinais por comunicação sem fio
- h) Desenvolver método para transmissão de dados em longas distâncias e em locais que não possuem redes de internet sem fio disponíveis

REFERÊNCIAS

BACK, Nelson et al. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem.** [S.I.]: Barueri: Manole, 2008. Citado nas pp. 34–37.

DOEBELIN, Ernest O. **Measurement system: Application and design.** 3. ed. Ohio: McGraw- Hill, 1983.

ESPRESSIF. **Documentação ESP32.** English. Jan. 2022. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Citado na p. 30.

GHARGHAN, Sadik Kamel; NORDIN, Rosdiadee; ISMAIL, Mahamod. DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A TRACK BICYCLE INSTRUMENT FOR TORQUE MEASUREMENT USING THE ZIGBEE WIRELESS SENSOR NETWORK. **International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems**, Walter de Gruyter GmbH, v. 10, n. 1, p. 124–145, 2017. DOI: 10.21307/ijssis-2017-206. Citado na p. 42.

HIBBEKER, R. C. **Resistência dos materiais.** 7. ed. São Paulo (SP): Pearson Education do Brasil, 2010. ISBN 9788576053736. Citado nas pp. 15, 18, 20–24.

HOLLMAN, Jack Philip. **Experimental methods for engineers.** 8. ed. [S.I.]: Mcgraw - Hill, 2011. Citado nas pp. 24–30, 32, 33.

INSTRUMENTS, Texas. **ADS1115 Datasheet.** English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/292735/TI/ADS1115.html>>. Citado na p. 31.

ISSO. **Documentação DMI TCR 44es.** English. Jan. 2022. Disponível em: <https://isso.digital/produtos/48/dmi_tcr_44es>. Citado na p. 39.

KYOWA. **Torque Transducers.** Mar. 2022. Disponível em: <https://kyowa-ei.meclib.jp/e2021/book/#target/page_no=208>. Citado nas pp. 16, 38.

MADGETECH. **Documentação Bridge101A.** English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://www.madgetech.com/products/bridge101a/>>. Citado na p. 40.

MINELA, Sthefani Neves. **EXTENSOMETRIA: ESTUDO E APLICAÇÃO**. 2017. Diss. (Mestrado) – UFSC, Joinville. Citado nas pp. 55–57, 59, 73, 75.

NEDIP-UFSC. **Metodologia PRODIP**. Jan. 2022. Disponível em: <<https://nedip.ufsc.br/sessao/modelo-prodip-1>>. Citado nas pp. 34–37.

NIEDWOROK, Andrzej. Dynamic torque measurement of drive transmission in vehicles being in motion using strain gauges measurement technique and wireless data transmission. *In:* 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications. [S.I.]: IEEE, ago. 2014. DOI: 10.1109/epe.2014.6910707. Citado na p. 41.

NORTON, Robert. **Machine design : an integrated approach**. Edição: 4th. 4. ed. Boston: Prentice Hall, 2011. ISBN 9780136123705. Citado nas pp. 19–21, 23.

NUMPY. **Documentação NumPy**. English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://numpy.org/doc/stable/>>. Citado na p. 34.

NURPRASETIO, Ignatius Pulung *et al.* Development of Static and Dynamic Online Measurement System for Ground Vehicles. *In:* 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT). [S.I.]: IEEE, out. 2018. DOI: 10.1109/icevt.2018.8628346. Citado nas pp. 15, 42.

PANDAS. **Documentação Pandas**. English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://pandas.pydata.org/docs/>>.

SILVA, Anderson; VARANIS, Marcus; MERELES, Arthur Guilherme. A consistent experimental approach for strain measurement: Two case studies. *In:* PROCEEDINGS of the XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. [S.I.]: ABMEC Brazilian Association of Computational Methods in Engineering, 2017. DOI: 10.20906/cps/cilamce2017-0718. Citado na p. 42.

SILVA, Anderson Langone; VARANIS, Marcus; MERELES, Arthur Guilherme *et al.* A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, FapUNIFESP (SciELO), v. 41, n. 3, dez. 2018. DOI: 10.1590/1806-9126-rbef-2018-0206.

TIM HALL, J.-P. Stacey. **Python 3 for Absolute Beginners**. [S.I.]: Springer-Verlag GmbH, mar. 2010. ISBN 9781430216339. Disponível em: <https://www.ebook.de/de/product/12469709/tim_hall_j_p_stacey_python_3_for_absolute_beginners.html>. Citado na p. 33.

Apêndices

APÊNDICE A – MATRIZ QFD DO PROJETO

Title: Dispositivo de sensoramento de torque dinâmico

Author: Anderson Vinícius de Oliveira Rosa

Date: February, 1.2022

Notes:

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Demand Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	Column #	Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (X)
1	9	8.9	3.57	Ser de baixo custo	1	▼
2	9	9.6	3.86	Ser leve	2	▲
3	9	10.3	4.14	Suporar grandes variações da faixa de torque	3	▲
4	9	10.3	4.14	Ter autonomia necessária	4	▲
5	9	10.0	4.00	Ser compacto	5	▲
6	9	12.5	5.00	Ser a prova de água e impurezas	6	▲
7	9	9.2	3.7	Ser de fácil manutenção	7	▲
8	9	10.3	4.14	Ser resistente a impactos	8	▲
9	9	10.0	4.00	Ter capacidade de armazenar dados	9	▲
10	3	8.9	3.57	Ser capaz de ligar e desligar	10	▲
						Target or Limit Value

Legend

- Strong Relationship
- Moderate Relationship
- Weak Relationship
- Strong Positive Correlation
- Positive Correlation
- Negative Correlation
- Objective Is To Minimize
- Objective Is To Maximize
- Objective Is To Hit Target

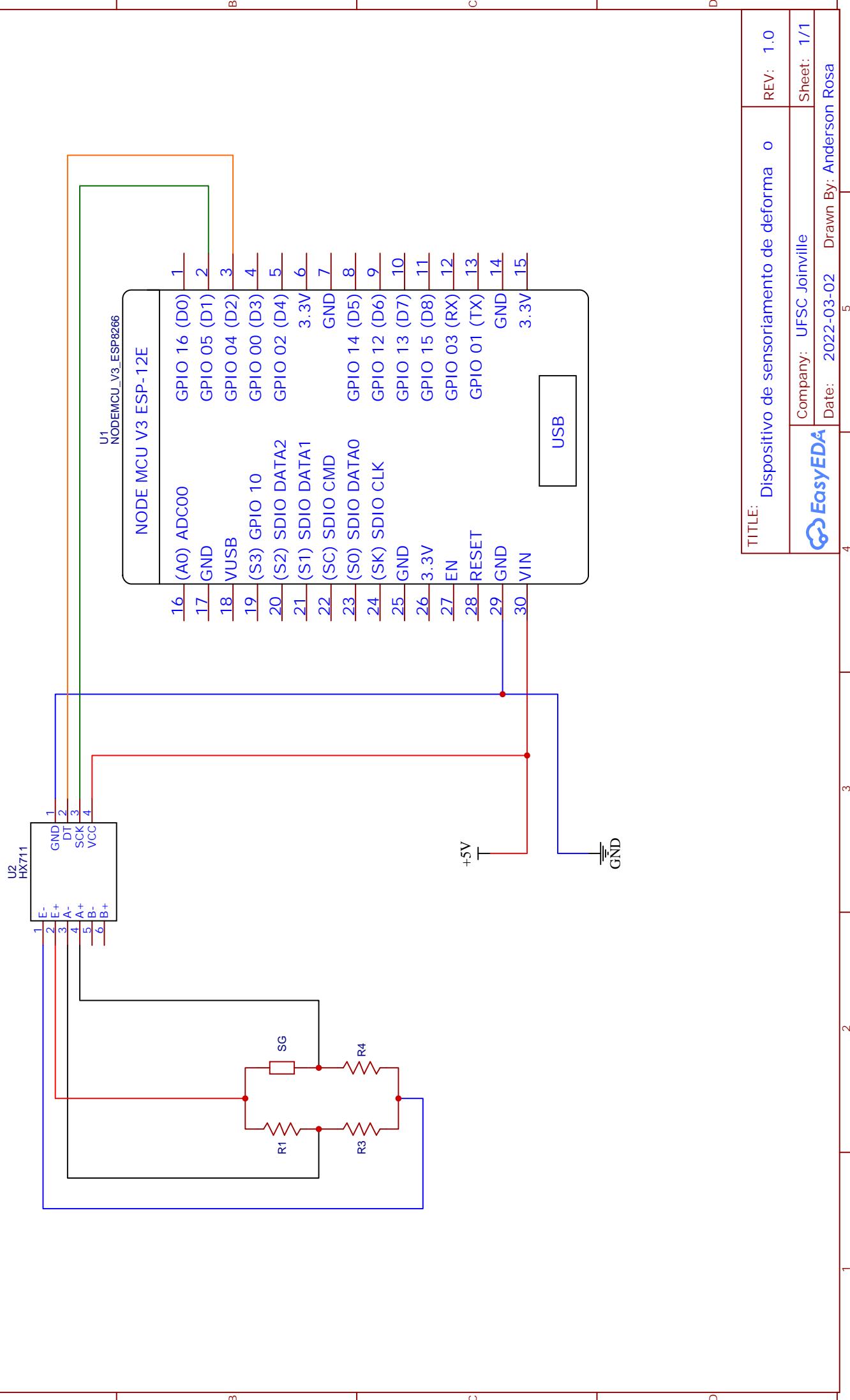
Competitive Analysis (0=Worst, 5=Best)

Competitor	Dispositivo de baixo custo	Transdutor de torque industrial	Dinamômetro de freio	Magtech Bridge 101A	Isso dmi tcr 44 es
Dispositivo de baixo custo	5	3	0	5	5
transdutor de torque industrial	5	3	0	5	5
Dinamômetro de freio	5	3	0	5	5
Magtech Bridge 101A	5	1	0	2	3
Isso dmi tcr 44 es	5	1	0	2	3

Powered by QFD Online (<http://www.QFDOOnline.com>)

APÊNDICE B – DESENHOS DO PROJETO DETALHADO DO DISPOSITIVO

B.1 PROJETO ELÉTRICO



APÊNDICE C – ALGORITMOS DO CONTROLADOR

C.1 ALGORITMO UTILIZANDO O CONTROLADOR ESP8266 E O AMPLIFICADOR HX711

```
1
2 #include <ESP8266WiFi.h>
3 #include <WiFiClient.h>
4 #include <ESP8266WebServer.h>
5 #include <ESP8266mDNS.h>
6 #include <Q2HX711.h>
7
8 #ifndef STASSID
9 #define STASSID "SSID"
10 #define STAPSK "WIFIPASS"
11 #endif
12
13 const char* ssid      = STASSID;
14 const char* password = STAPSK;
15
16 const byte hx711_data_pin = D2;
17 const byte hx711_clock_pin = D1;
18
19 Q2HX711 hx711(hx711_data_pin, hx711_clock_pin);
20
21 ESP8266WebServer server(80);
22
23 void handleRead() {
24     if (server.method() != HTTP_POST) {
25         server.send(405, "text/plain", "Method now allowed");
26     } else {
27         server.send(200, "text/plain", String(hx711.read()) +
28                     server.arg("plain"));
29     }
30
31 void setup(void) {
32     Serial.begin(9600);
33     WiFi.begin(ssid, password);
34     Serial.println("");
35
36 // Wait for connection
```

```
37  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {  
38      delay(500);  
39      Serial.print(".");  
40  }  
41  Serial.println("");  
42  Serial.print("Connected to ");  
43  Serial.println(ssid);  
44  Serial.print("IP address: ");  
45  Serial.println(WiFi.localIP());  
46  
47  if (MDNS.begin("esp8266")) {  
48      Serial.println("MDNS responder started");  
49  }  
50  
51  server.on("/read", handleRead);  
52  
53  server.begin();  
54  Serial.println("HTTP server started");  
55 }  
56  
57 void loop(void) {  
58     server.handleClient();  
59 }
```

C.2 ALGORITMO UTILIZANDO O CONTROLADOR ESP32 E O AMPLIFICADOR ADS1115

```
1  
2 #include "Wire.h"  
3 #include "Adafruit_ADS1X15.h"  
4  
5 Adafruit_ADS1115 ads;  
6  
7 int delay_time = 25;  
8  
9 void setup() {  
10     Serial.begin(115200);  
11  
12     ads.setGain(GAIN_SIXTEEN);      // 16x +/- 0.256V 1 bit =  
13         0.0078125mV  
14     ads.begin();  
15 }
```

```
15
16
17 void loop() {
18     int16_t ads_value = ads.readADC_Differential_0_1();
19     Serial.println(ads_value);
20     delay(delay_time);
21 }
```

APÊNDICE D – ALGORITMOS DO SOFTWARE DE OBTENÇÃO DE DADOS

D.1 OBJETO NETWORKDEVICE

```
1  from time import sleep
2
3
4  from matplotlib import pyplot as plt
5  from numpy import array, append
6  from requests import post
7
8
9  class NetworkDevice:
10     """
11         Creates a local network connection device object
12     """
13
14     def __init__(self, ip, delay_time):
15         self.url = f'http://{ip}/read'
16         self.delay_time = delay_time
17         self.offset = 0
18         self.a = 1
19         self.b = 0
20
21     def read_line(self, calibrated: bool = False):
22         """returns the last line of data sent by the device"""
23         read = int(post(self.url).text) - self.offset
24         if calibrated:
25             return self.a * read + self.b
26         else:
27             return read
28
29     def calibrate_offset(self):
30         """sets the offset value for the device data gathering"""
31         self.offset = 0
32         self.offset =
33             round(self.read_samples(n_of_samples=40).mean())
34
35     def calibrate_readings(self, calibration_dict_1: dict,
36                           calibration_dict_2: dict):
37         """calibrate the device readings"""
38         w1 = calibration_dict_1['nominal_value']
```

```
37     w2 = calibration_dict_2['nominal_value']
38     r1 = round(calibration_dict_1['signal'].mean())
39     r2 = round(calibration_dict_1['signal'].mean())
40
41     self.b = w2 / ((r2 / r1) * (w1 - 1) + 1)
42     self.a = (w1 - self.b) / r1
43
44     def read_samples(self, n_of_samples: int, plot: bool = False,
45                      calibrated: bool = False):
46         """returns a number of data lines given a sample size"""
47
48         if not plot:
49             value_list = array([])
50             while len(value_list) < n_of_samples:
51                 value_list = append(
52                     value_list,
53                     int(self.read_line(calibrated=calibrated)))
54             sleep(self.delay_time)
55             # print(f"sample: {len(value_list)}, value:
56             #       {int(value_list[-1])}")
57
58         else:
59             value_list = self.plot_data(n_of_samples=n_of_samples,
60                                         calibrated=calibrated)
61
62     def plot_data(self, n_of_samples: int, calibrated: bool = False):
63         """plot the numerical data received"""
64         value_list = array([])
65
66         plt.ion()
67         fig, axs = plt.subplots(1)
68         fig.suptitle('Readings')
69
70         while len(value_list) < n_of_samples:
71             try:
72                 value_list = append(value_list,
73                     int(self.read_line(calibrated=calibrated)))
74             axs.cla()
```

```
75         axs.plot(value_list[-25:])
76
77         plt.pause(self.delay_time)
78
79     except:
80         print("error!")
81
82     plt.close()
83
84 return value_list
```

D.2 INTERFACE GRÁFICA

```
1 """
2 """
3 script to start the user interface
4 """
5
6 from datetime import datetime
7 from time import sleep
8
9 from tkinter import * # sudo apt-get install python3-tk
10 from tkinter import scrolledtext
11 from tkinter.ttk import *
12
13 from pandas import DataFrame
14
15 from device.network_device import NetworkDevice
16
17
18 def gui_start():
19     """starts the GUI"""
20
21     def button_connect():
22         """connects device in the selected ip address"""
23         txt_address.config(state='disabled')
24         txt_read_delay.config(state='disabled')
25         btn_connect.config(state='disabled')
26         btn_disconnect.config(state='normal')
27
28         nonlocal wireless_device
29         wireless_device = NetworkDevice(
```

```
30         ip=txt_address.get(),
31         delay_time=int(txt_read_delay.get())*1E-3
32     )
33     check_device_compatibility(wireless_device)
34
35     def button_stop():
36         """close connection with device"""
37         txt_address.config(state='normal')
38         txt_read_delay.config(state='normal')
39         btn_connect.config(state='normal')
40         btn_disconnect.config(state='disabled')
41         btn_run.config(state='disabled')
42
43     def button_calibration_lock():
44         """calibrates the device"""
45         from numpy import array
46         btn_calibrate_lock.config(state='disabled')
47         txt_r2.config(state='disabled')
48         txt_r1.config(state='disabled')
49         txt_v1.config(state='disabled')
50         txt_v2.config(state='disabled')
51         wireless_device.calibrate_readings(
52             {'nominal_value': int(txt_v1.get()), 'signal':
53                 array([int(txt_r1.get())])},
54             {'nominal_value': int(txt_v2.get()), 'signal':
55                 array([int(txt_r2.get())])}
56         )
57         serial_monitor.config(state='normal')
58         serial_monitor.insert(END, f'device calibrated!! \n')
59         serial_monitor.insert(END, f'factor a: {wireless_device.a}\n')
60         serial_monitor.insert(END, f'factor b: {wireless_device.b}\n')
61         serial_monitor.config(state='disabled')
62         txt_v1.config(state='disabled')
63         txt_v2.config(state='disabled')
64         txt_r1.config(state='disabled')
65         txt_r2.config(state='disabled')
66         btn_calibrate_unlock.config(state='normal')
67
68     def button_calibration_unlock():
69         """resets device calibration"""
```

```
68     wireless_device.a = 0
69     wireless_device.b = 0
70     btn_calibrate_lock.config(state='normal')
71     txt_v1.config(state='normal')
72     txt_v2.config(state='normal')
73     txt_r1.config(state='normal')
74     txt_r2.config(state='normal')
75     btn_calibrate_unlock.config(state='disabled')
76
77     def check_device_compatibility(Device):
78         """gets a sample of data from the ip address"""
79
80         serial_monitor.config(state='normal')
81         serial_monitor.insert(END, f'connecting to device in
82             address:\n{device_ip}... ')
83
84         try:
85             result = Device.read_line()
86             serial_monitor.insert(END, f'success!! \n')
87             serial_monitor.insert(END, f'value: {result} \n')
88             serial_monitor.insert(END, f'calibrating offset...')
89             wireless_device.calibrate_offset()
90             serial_monitor.insert(END, f'done!\n')
91             serial_monitor.see('end')
92             serial_monitor.config(state='disabled')
93             btn_run.config(state='normal')
94             btn_calibrate_lock.config(state='normal')
95             txt_v1.config(state='normal')
96             txt_v2.config(state='normal')
97             txt_r1.config(state='normal')
98             txt_r2.config(state='normal')
99
100        except:
101            serial_monitor.config(state='normal')
102            serial_monitor.insert(END, 'Incompatible device! \n\n')
103            serial_monitor.config(state='disabled')
104            serial_monitor.see('end')
105            button_stop()
106
107        def run_experiment():
108            """plots stuff"""
109            DataFrame(
```

```
109         wireless_device.read_samples(
110             n_of_samples=int(txt_n_samples.get()),
111             plot=True,
112             calibrated=True
113         )
114     ).to_csv(f"results/{datetime.now()}_{{txt_report_name.get()}}")
115
116     wireless_device = None
117
118     # initial device port and read rate data
119     device_ip = '192.168.4.1'
120     read_delay = 50
121
122     # initial device calibration
123     v1 = 0          # nominal value of the first data point
124     v2 = 1          # nominal value of the second data point
125     r1 = 0          # read value of the first data point
126     r2 = 1          # read value of the first data point
127
128     # starting the gui object
129     root = Tk()
130     root.title("Telemetry center (alpha 0.1.0)")
131
132     # connection setup frame
133     frame_connection = LabelFrame(root, text="Connection setup")
134     frame_connection.pack(padx=10, pady=5)
135
136     lbl_address = Label(frame_connection, text="Device address: ",
137         font=('Arial', 11))
138     lbl_address.grid(row=10, column=0)
139     txt_address = Entry(frame_connection)
140     txt_address.insert(END, device_ip)
141     txt_address.grid(row=11, column=0, columnspan=2)
142
143     lbl_read_delay = Label(frame_connection, text="Sampling
144         rate[ms]: ", font=('Arial', 11))
145     lbl_read_delay.grid(row=30, column=0, padx=10)
146     txt_read_delay = Entry(frame_connection)
147     txt_read_delay.insert(END, read_delay)
148     txt_read_delay.grid(row=31, column=0, columnspan=2)
```

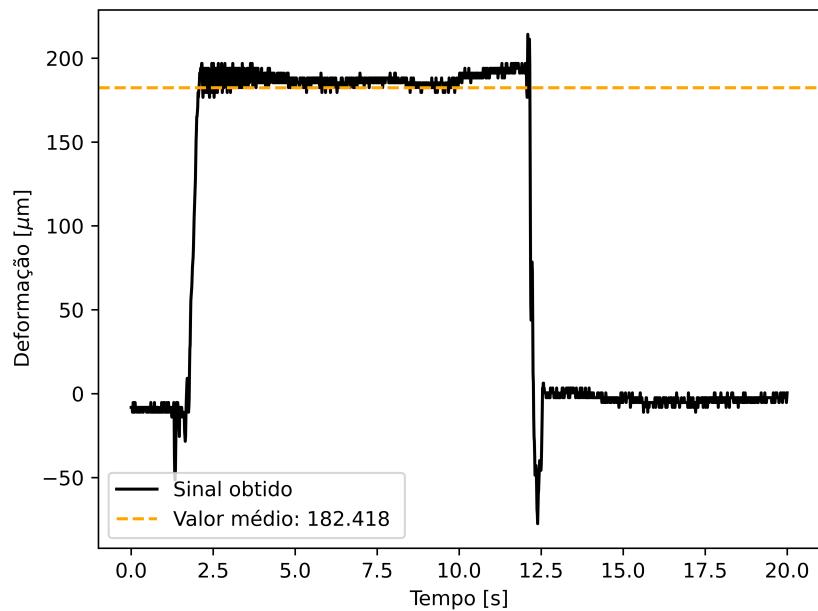
```
        command=button_connect)
149    btn_connect.grid(row=41, column=0, pady=10)
150    btn_disconnect = Button(frame_connection, text='Disconnect',
151                           command=button_stop, state='disabled')
152    btn_disconnect.grid(row=41, column=1, padx=20)
153
154    # calibration setup frame
155    frame_calibration = LabelFrame(root, text="Device Calibration")
156    frame_calibration.pack(padx=10, pady=5)
157
158    lbl_v1 = Label(frame_calibration, text="Nominal value 1: ",
159                  font=('Arial', 11))
160    lbl_v1.grid(row=50, column=0)
161    txt_v1 = Entry(frame_calibration)
162    txt_v1.insert(END, v1)
163    txt_v1.config(state='disabled')
164    txt_v1.grid(row=51, column=0, columnspan=1)
165
166    lbl_v2 = Label(frame_calibration, text="Nominal value 2: ",
167                  font=('Arial', 11))
168    lbl_v2.grid(row=60, column=0, padx=10)
169    txt_v2 = Entry(frame_calibration)
170    txt_v2.insert(END, v2)
171    txt_v2.config(state='disabled')
172    txt_v2.grid(row=61, column=0, columnspan=1)
173
174    lbl_r1 = Label(frame_calibration, text="Read average 1: ",
175                  font=('Arial', 11))
176    lbl_r1.grid(row=50, column=1)
177    txt_r1 = Entry(frame_calibration)
178    txt_r1.insert(END, r1)
179    txt_r1.config(state='disabled')
180    txt_r1.grid(row=51, column=1, columnspan=1)
181
182    lbl_r2 = Label(frame_calibration, text="Read average 2: ",
183                  font=('Arial', 11))
184    lbl_r2.grid(row=60, column=1)
185    txt_r2 = Entry(frame_calibration)
186    txt_r2.insert(END, r2)
187    txt_r2.config(state='disabled')
188    txt_r2.grid(row=61, column=1, columnspan=1)
```

```
185
186     btn_calibrate_lock = Button(frame_calibration, text='Calibrate',
187         command=button_calibration_lock, state='disabled')
187     btn_calibrate_lock.grid(row=71, column=0, pady=10)
188
189     btn_calibrate_unlock = Button(frame_calibration, text='Reset',
190         command=button_calibration_unlock, state='disabled')
190     btn_calibrate_unlock.grid(row=71, column=1, pady=10)
191
192     # experiment frame
193     frame_monitor = LabelFrame(root, text="Serial monitor")
194     frame_monitor.pack(padx=10, pady=5)
195
196     serial_monitor = scrolledtext.ScrolledText(frame_monitor,
197         font=('Arial', 10), width=32, height=10, state='disabled')
197     serial_monitor.grid(row=10, column=0, columnspan=2, padx=10,
198                         pady=5)
198
199     lbl_report_name = Label(frame_monitor, text="Report name: ",
200         font=('Arial', 11))
200     lbl_report_name.grid(row=20, column=0, padx=0)
201     txt_report_name = Entry(frame_monitor)
202     txt_report_name.insert(END, '')
203     txt_report_name.grid(row=21, column=0, columnspan=2)
204
205     lbl_n_samples = Label(frame_monitor, text="Number of samples to
206         get: ", font=('Arial', 11))
206     lbl_n_samples.grid(row=30, column=0, padx=0)
207     txt_n_samples = Entry(frame_monitor)
208     txt_n_samples.insert(END, 250)
209     txt_n_samples.grid(row=31, column=0, columnspan=2)
210
211     btn_run = Button(frame_monitor, text='run',
212         command=run_experiment, state='disabled')
212     btn_run.grid(row=31, column=1, pady=10)
213
214     # kill process button
215     frame_root = Frame(root)
216     frame_root.pack()
217     btn_kill = Button(frame_root, text='Exit', command=root.destroy)
218     btn_kill.grid(row=100, pady=5)
219
```

```
220     # keep gui running in loop
221     root.mainloop()
222
223
224 if __name__ == '__main__':
225     gui_start()
```

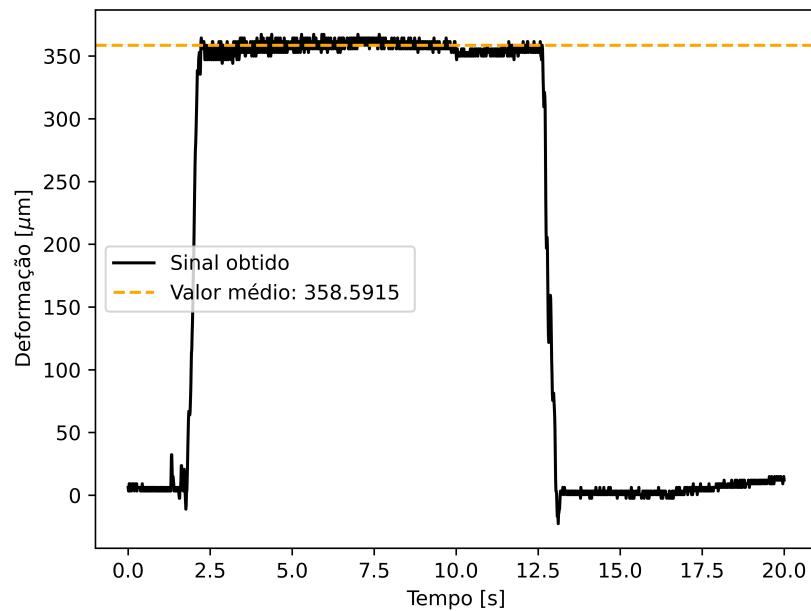
APÊNDICE E – SINAIS OBTIDOS PELO PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO

Figura 50 – Sinal obtido da aplicação de 0,138 kg de carga aplicada no dispositivo



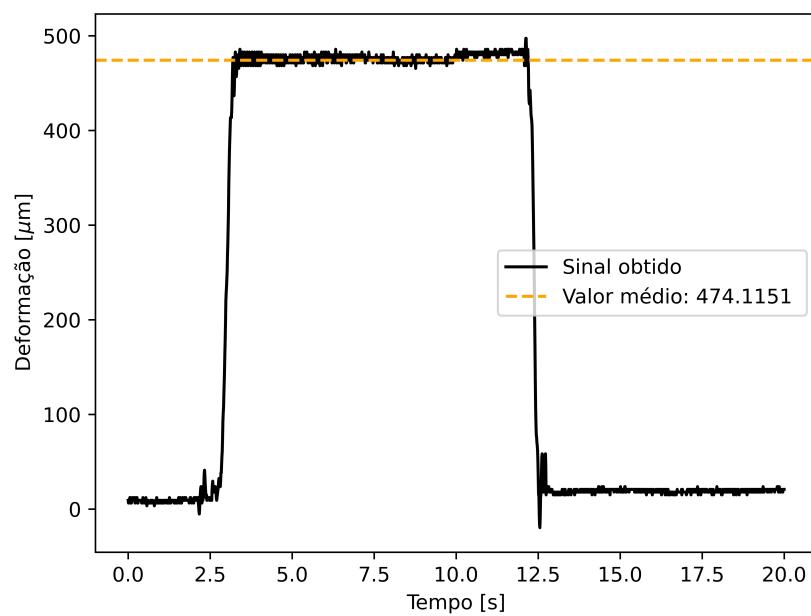
Fonte: O autor 2022

Figura 51 – Sinal obtido da aplicação de 0,250 kg de carga aplicada no dispositivo



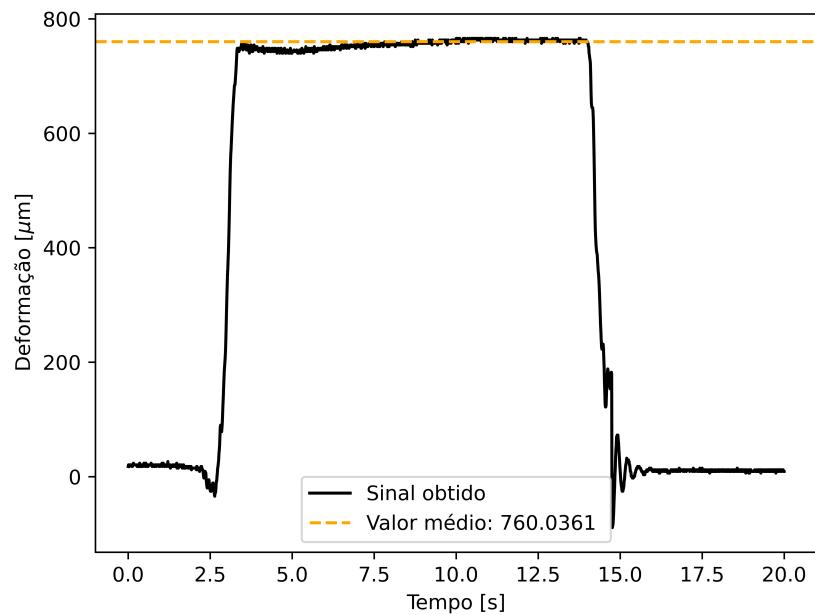
Fonte: O autor 2022

Figura 52 – Sinal obtido da aplicação de 0,337 kg de carga aplicada no dispositivo



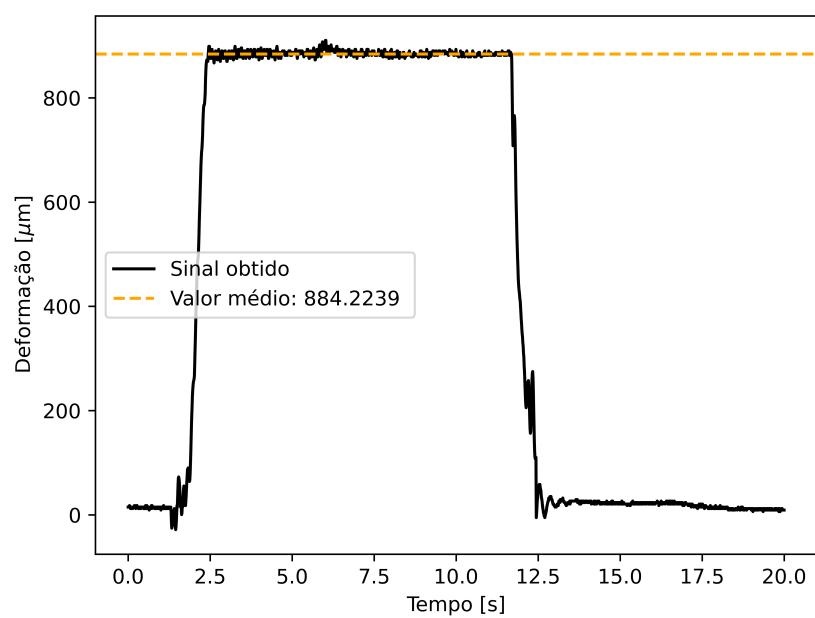
Fonte: O autor 2022

Figura 53 – Sinal obtido da aplicação de 0,549 kg de carga aplicada no dispositivo



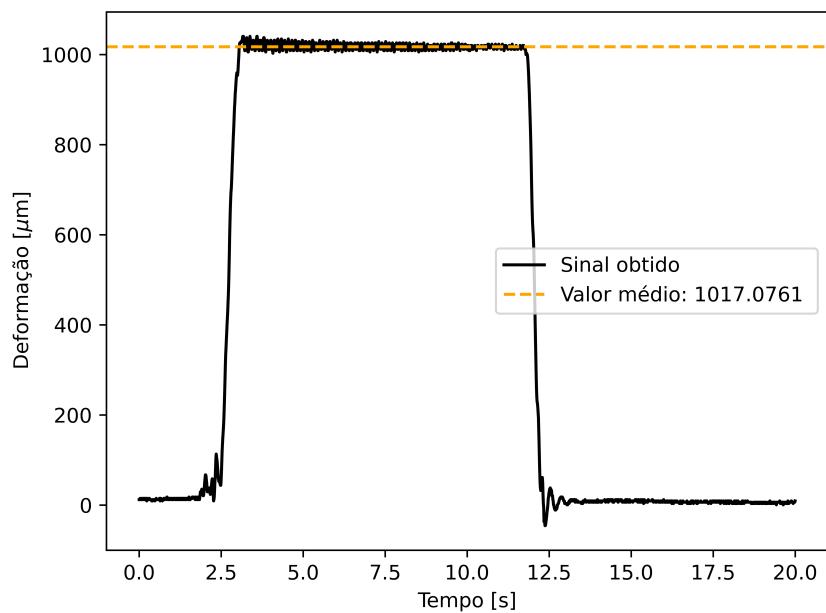
Fonte: O autor 2022

Figura 54 – Sinal obtido da aplicação de 0,636 kg de carga aplicada no dispositivo



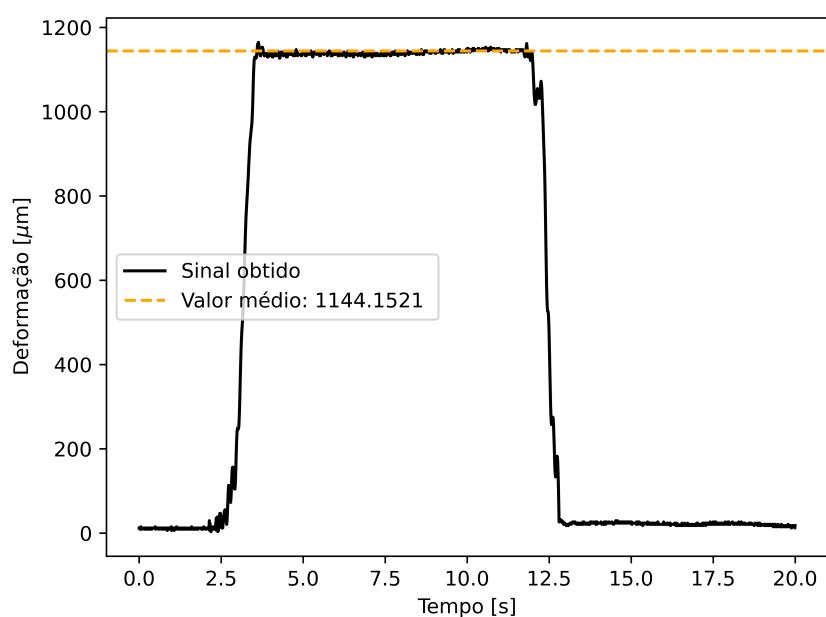
Fonte: O autor 2022

Figura 55 – Sinal obtido da aplicação de 0,748 kg de carga aplicada no dispositivo



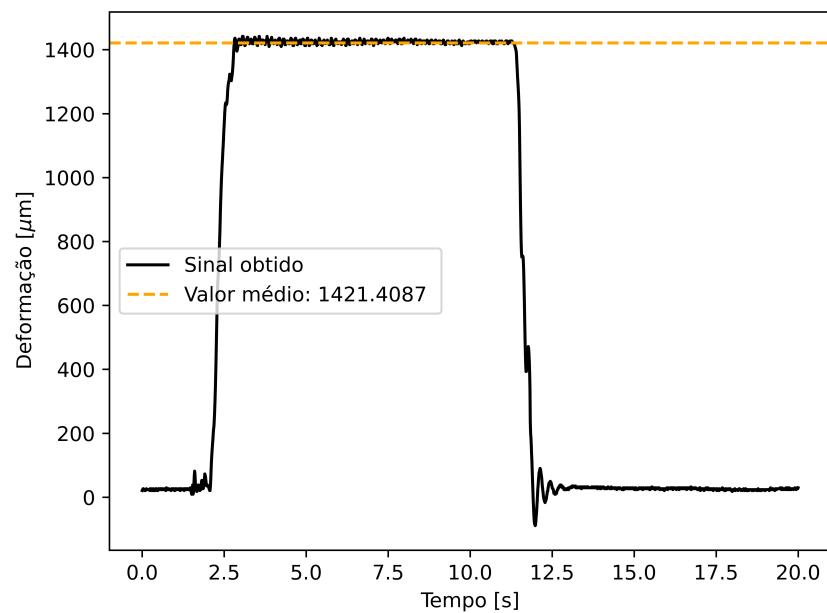
Fonte: O autor 2022

Figura 56 – Sinal obtido da aplicação de 0,834 kg de carga aplicada no dispositivo



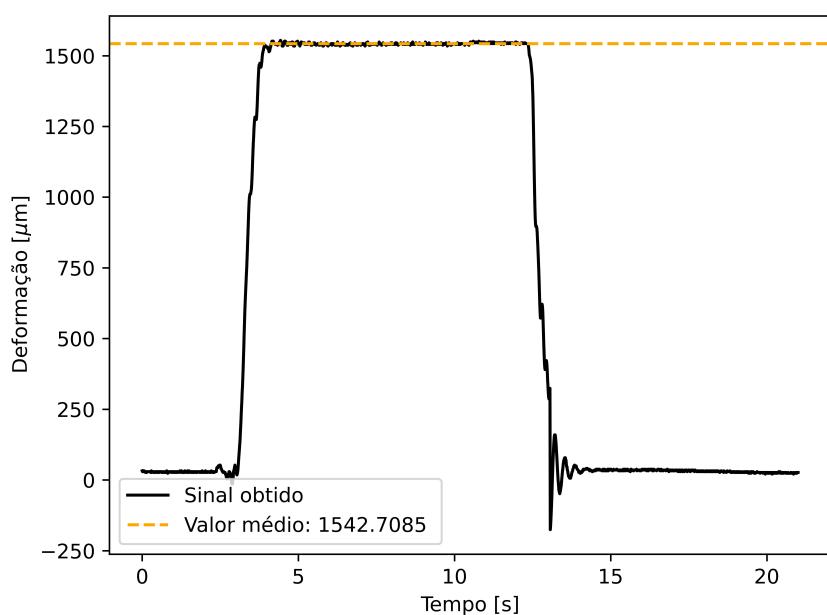
Fonte: O autor 2022

Figura 57 – Sinal obtido da aplicação de 1,040 kg de carga aplicada no dispositivo



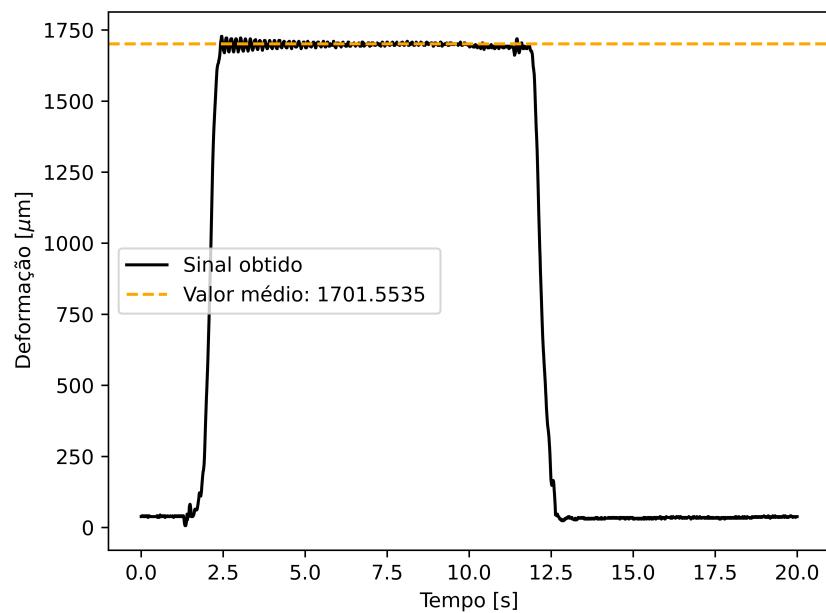
Fonte: O autor 2022

Figura 58 – Sinal obtido da aplicação de 1,135 kg de carga aplicada no dispositivo



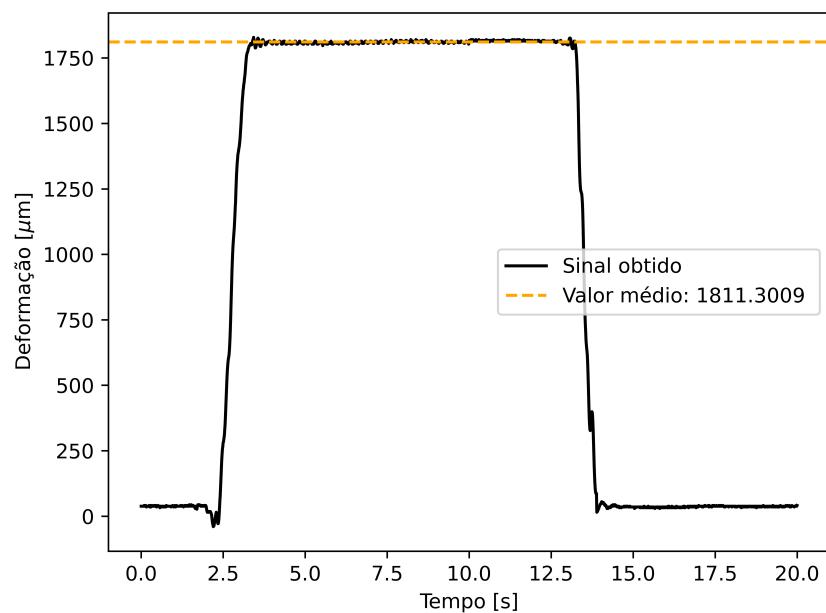
Fonte: O autor 2022

Figura 59 – Sinal obtido da aplicação de 1,250 kg de carga aplicada no dispositivo



Fonte: O autor 2022

Figura 60 – Sinal obtido da aplicação de 1,330 kg de carga aplicada no dispositivo



Fonte: O autor 2022