



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

Anderson Vinícius de Oliveira Rosa

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE BAIXO CUSTO PARA
SENSORIAMENTO DE DEFORMAÇÃO**

Joinville, Santa Catarina – Brasil
2021

Anderson Vinícius de Oliveira Rosa

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE BAIXO CUSTO PARA
SENSORIAMENTO DE DEFORMAÇÃO**

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
2021

Notas legais:

Não há garantia para qualquer parte do software documentado. Os autores tomaram cuidado na preparação desta tese, mas não fazem nenhuma garantia expressa ou implícita de qualquer tipo e não assumem qualquer responsabilidade por erros ou omissões. Não se assume qualquer responsabilidade por danos incidentais ou consequentes em conexão ou decorrentes do uso das informações ou programas aqui contidos.

Catalogação na fonte pela Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina.
Arquivo compilado às 02:34h do dia 15 de fevereiro de 2022.

Anderson Vinícius de Oliveira Rosa

Desenvolvimento de dispositivo de baixo custo para sensoriamento de deformação / Anderson Vinícius de Oliveira Rosa; Orientador, Andrea Piga Carboni, Dr.; Coorientador, Marcos Alves Rabelo, Dr. - Joinville, Santa Catarina - Brasil, 15 de dezembro de 2021.

56 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 dispositivo de baixo custo para sensoriamento de deformação

Anderson Vinícius de Oliveira Rosa

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO DE BAIXO CUSTO PARA
SENSORIAMENTO DE DEFORMAÇÃO**

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, 15 de dezembro de 2021.

Nome do Coordenador(a), Dr.
Coordenador(a) do Departamento de
Engenharias da Mobilidade

Banca Examinadora:

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

Marcos Alves Rabelo, Dr.
Coorientador
Universidade Federal de Santa
Catarina – UFSC

Prof. Convidado 1, Dr.
Instituição 1 – Sigla 1

Prof. Convidado 2, Dr.
Instituição 2 – Sigla 2

Prof. Convidado 3, Dr.
Instituição 3 – Sigla 3

Prof. Convidado 4, Dr.
Instituição 4 – Sigla 4

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

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/>

“Assim como aquele pecado da juventude, este documento te perseguirá pelo resto da vida.”

Enio Valmor Kassick

“Estupidez trará mais autoconfiança do que o conhecimento e a bravura juntas. (encoding: T1, family: phv, series: m, shape: it, size: 10, baseline: 12.0pt, linespread: 1.241, linespacing: 14.89197pt)”

Adriano Ruseler

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	- Forças internas atuando em um corpo em equilíbrio	18
Figura 2	- Exemplo de diagrama tensão-deformação	19
Figura 3	- Deflexão de uma barra sob carga de tração	20
Figura 4	- Representação do efeito da deflexão em uma viga sob flexão . .	21
Figura 5	- Deflexão e distribuição de tensão em uma sob flexão	22
Figura 6	- Extensômetro fixado á um corpo de prova	23
Figura 7	- Ponte de Wheatstone	24
Figura 8	- Princípio de funcionamento de um amplificador de sinal	26
Figura 9	- Ilustração de ruidos presentes em sinais analógicos e digitais . .	27
Figura 10	- Representação gráfica de um sinal analógico em forma digital . .	27
Figura 11	- Diagrama de blocos dos estágios de um sistema de medição . . .	28
Figura 12	- Controlador ESP32	29
Figura 13	- Amplificador de sinal ADS1115	30
Figura 14	- Regressão linear	33
Figura 15	- Etapas da metodologia PRODIP	34
Figura 16	- Etapas do projeto informacional	35
Figura 17	- Etapas do projeto conceitual	36
Figura 18	- Datalogger DMI TCR 44es	39
Figura 19	- Dispositivo Bridge101A	40
Figura 20	- Dispositivo de ensaio de flexão	43
Figura 21	- Sistema de medição utilizado por (MINELA, 2017)	44
Figura 22	- Sistema de de medição utilizando o LINUX ADS2002	44
Figura 23	- Protótipo do dispositivo desenvolvido conectado com o extenso- metro no dispositivo de flexão	45
Figura 24	- Aplicaçao do 'peso 3' no dispositivo de flexão	47
Figura 25	- Sinal obtido sem a aplicação de cargas no dispositivo	50
Figura 26	- Sinal obtido pela aplicação da cargas de calibração baixa	50
Figura 27	- Sinal obtido pela aplicação da cargas de calibração alta	51
Figura 28	- Amostras e valores médios obtidos	51
Figura 29	- Função de ajuste de dados de deformação em relação aos valores obtidos no amplificador	52
Figura 30	- Comparação dos valores convertidos usando diferentes funções de ajuste	53
Figura 31	- Erro entre valores encontrados com a função de ajuste e os valo- res esperados pela análise analítica	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Funções do pacote NumPy utilizadas	32
Tabela 2	– Benchmarking entre dispositivos encontrados	39
Tabela 3	– Características de ganho para o ADS1115	42
Tabela 5	– Valores de massas utilizadas para aplicação das cargas nos dispositivos de flexão e torção	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Γ Letra grega Gama

Λ Lambda

ζ Letra grega minúscula zeta

\in Pertence

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	SOLICITAÇÕES E RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS	17
2.1.1	Deformação e limites do material	18
2.1.2	Deformação de uma viga em flexão	20
2.2	EXTENSOMETRIA	22
2.2.1	Ponte de Wheatstone	24
2.3	OBTENÇÃO DE SINAIS	26
2.4	SISTEMAS DE MEDAÇÃO	28
2.5	ANÁLISE DOS SINAIS OBTIDOS	30
2.5.1	Ambiente de desenvolvimento computacional Python	31
2.5.2	Análise dos valores nominais	32
2.6	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE PRODUTO	33
2.6.1	Fase de planejamento	34
2.6.2	Projeto informacional	35
2.6.3	Projeto conceitual	36
2.6.4	Projeto preliminar	37
2.6.5	Projeto detalhado	37
3	DESENVOLVIMENTO	38
3.1	PLANEJAMENTO DO PROJETO	38
3.1.1	Mapeamento tecnológico	38
3.1.2	Pesquisa científica	39
3.2	PROJETO INFORMACIONAL	41
3.3	ELABORAÇÃO DO CONCEITO	41
3.4	PREPARAÇÃO DO PROTÓTIPO	41
3.5	VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO	41
3.5.1	Dispositivo para ensaio de flexão	42
3.5.2	Sistemas de medição	43
3.5.3	Cargas aplicadas	46
4	RESULTADOS	49
4.1	SINAIS OBTIDOS	49

4.1.1	Sinais de calibração	49
4.1.2	Ruídos presentes	49
4.1.3	Valores nominais	49
4.2	FUNÇÕES DE AJUSTE	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, é notado 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, (HIBBELE, 2010) afirma que “a carga para a qual um elemento é projetado pode ser diferente das cargas realmente aplicadas. As dimensões estipuladas no projeto de uma estrutura ou máquina podem não ser exatas, na realidade, por causa de erros de fabricação ou cometidos na montagem de seus componentes”.

Segundo (HIBBELE, 2010) “Para se garantir a segurança, é preciso escolher uma tensão admissível que restrinja a carga aplicada a um valor menor do que a carga que o elemento pode suportar totalmente.” Então como resposta às incertezas envolvidas no projeto analítico de um componente os projetistas devem projetar componentes que suportam forças superiores às presentes na utilização do componente. O que resulta em altos valores de fator de segurança em um projeto, o que causa impacto monetário e aumento de massa do componente. Uma das maneiras que permite a diminuição de valores de fator de segurança é a alimentação do projeto do componente com dados de cargas que representam o mais próximo o possível aos presentes na situação real.

Dados reais de utilização podem ser obtidos por sensores em componentes reais ou de teste submetidos a situações reais, porém atualmente certos parâmetros não podem ser facilmente medidos de maneira direta em um veículo, dentre eles forças normais e forças torcionais (NURPRASETIO *et al.*, 2018). Hibbeler afirma que “as medições de deformação são experimentais e, uma vez obtidas, podem ser relacionadas com as cargas aplicadas, ou tensões, que agem no interior do corpo.” Logo conclui-se que uma maneira direta de medir as forças internas atuantes em um componentes é obtendo os dados de deformação local.

Foi observado que dispositivos utilizados para obter dados de deformação em tempo real com precisão são usualmente utilizados em testes de impacto e de controle de qualidade em componentes pela indústria automotiva, esses dispositivos apresentam altos níveis de precisão e confiabilidade e, consequentemente altos custos, o que inviabiliza sua utilização fora do produto final. Os valores de deformação local em um componente podem ser obtidos utilizando sensores de deformação chamados de extensômetros, esses sensores apresentam uma boa disponibilidade no mercado e são amplamente utilizados em células de carga. Os sinais gerados por esse tipo de sensor devem ser instrumentados, ampliados e convertidos para possibilitar sua obtenção por uma interface controladora.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de um dispositivo de baixo custo para obtenção de dados de deformação em componentes. O desen-

volvimento 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, o funcionamento, efetividade e precisão do protótipo desenvolvido será avaliado comparando dados obtidos pelo protótipo e por um dispositivo industrial homologado, seguindo a metodologia de ([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 em tempo real de deflexão em componentes mecânicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Obter dados de deflexão em vigas

Obter módulo de elasticidade de uma liga desconhecida

Desenvolver utilizando tecnologias de código aberto

Obter valores de precisão do protótipo desenvolvido

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.

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

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

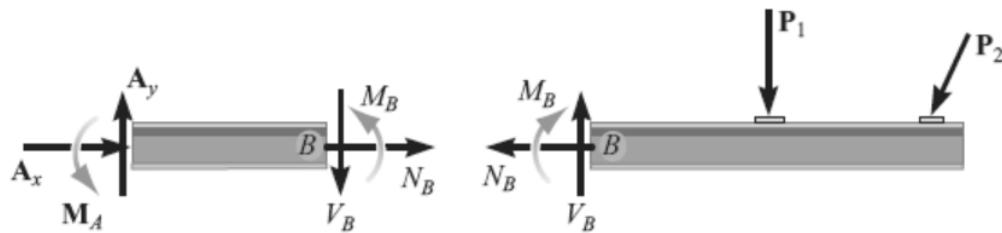
onde

F_i : Forças axiais aplicadas no corpo no eixo "i"

M_i : Momentos aplicados no corpo no eixo "i"

Para ser mantida a condição de integridade do corpo do material sobre forças externas devem estar presentes forças e momentos internos ao seu corpo, ([HIBBELER, 2010](#)) ressalta que “Uma das mais importantes aplicações da estática na análise de problemas de resistência dos materiais é poder determinar a força e o momento resultantes que agem no interior de um corpo e que são necessários para manter a integridade do corpo quando submetido a cargas externas” e que “a força e o momento que agem em um ponto específico da área seccionada de um corpo representam os efeitos resultantes da distribuição de forças que agem sobre a área seccionada”. A [Figura 1](#) apresenta uma representação gráfica da atuação de forças internas em um material:

Figura 1 – Forças internas atuando em um corpo em equilíbrio



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

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.

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 seu comprimento relativo à força aplicada. 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](#))

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

onde

ε : Deformação

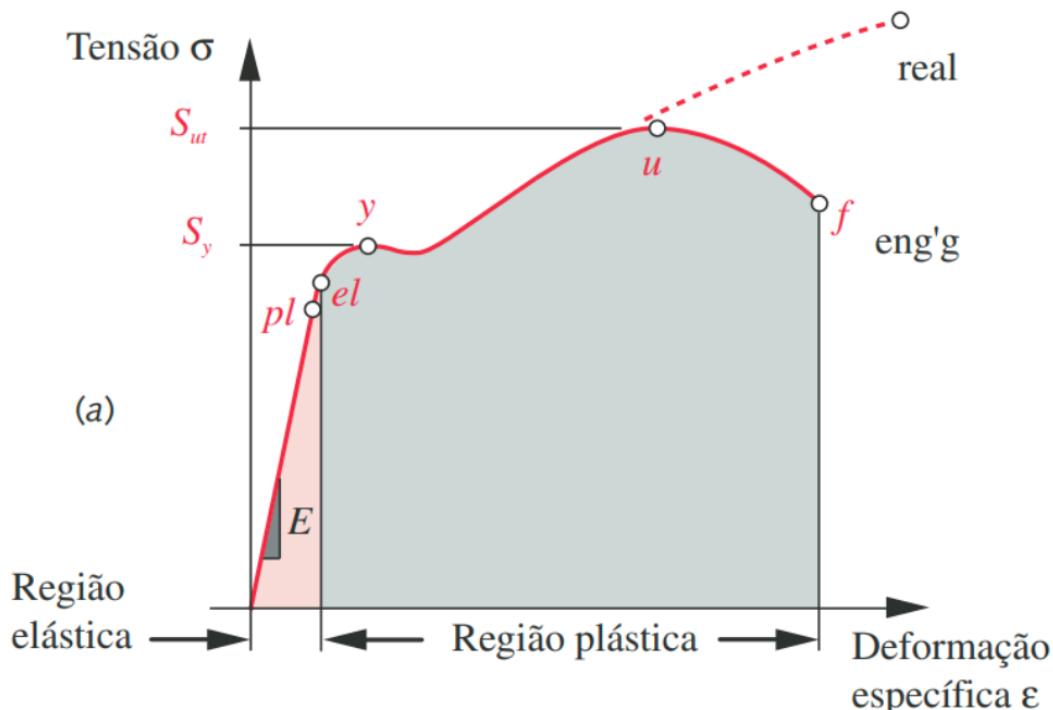
l : Comprimento da barra após deformação

l_0 : Comprimento da barra sem deformação

Com o objetivo de descobrir os limites no qual um material pode-se deformar antes de sua ruptura devem ser analisados seus diagramas tensão-deformação. 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 sem independentemente de suas características físicas e geométricas ([HIBBEKER, 2010](#)). Um exemplo de diagrama tensão-deformação é mostrado na [Figura 2](#).

Analizando o diagrama anterior pode-se notar uma zona de relacionamento linear entre a força aplicada no corpo de prova utilizado para construir o diagrama e sua deformação, nesta região é observado o comportamento de deformação elástica do

Figura 2 – Exemplo de diagrama tensão-deformação



Fonte: (NORTON, 2011)

material e sobre seu limite (NORTON, 2011) afirma que os pontos pl e el “marca o limiar entre as regiões de comportamento elástico e comportamento plástico do material. Os pontos el e pl normalmente são tão próximos que eles quase sempre são considerados o mesmo.”

Na maior parte dos materiais de engenharia é verificada uma relação linear entre deformação e tensão dentro da região elástica, logo, um aumento proporcional na força aplicada em um material resulta 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).

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

onde

σ : Tensão interna do material

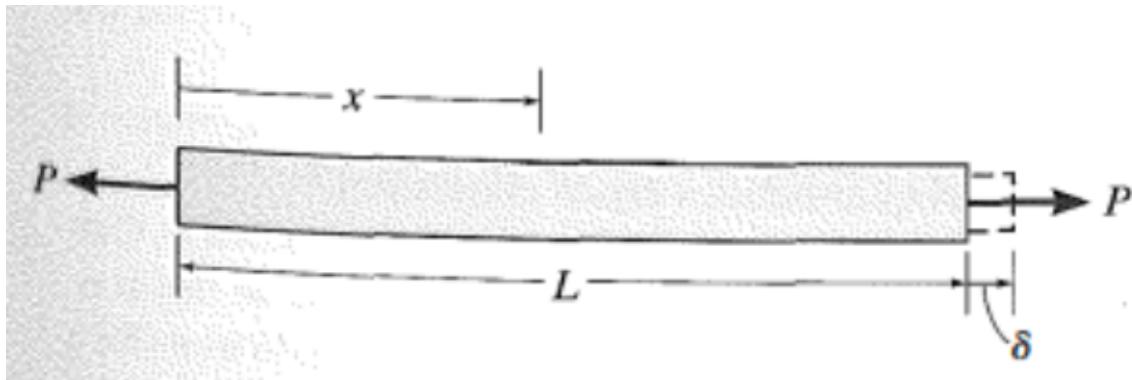
E : Módulo de elasticidade do material

ε : Deformação presente no material

A variável E da equação da Lei de Hooke é representa 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 (HIBBEKER, 2010).

Figura 3 – Deflexão de uma barra sob carga de tração



Fonte: (HIBBEKER, 2010)

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

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

onde

δ : Deformação

P : Carga de tração aplicada na barra

A : Área da seção transversal

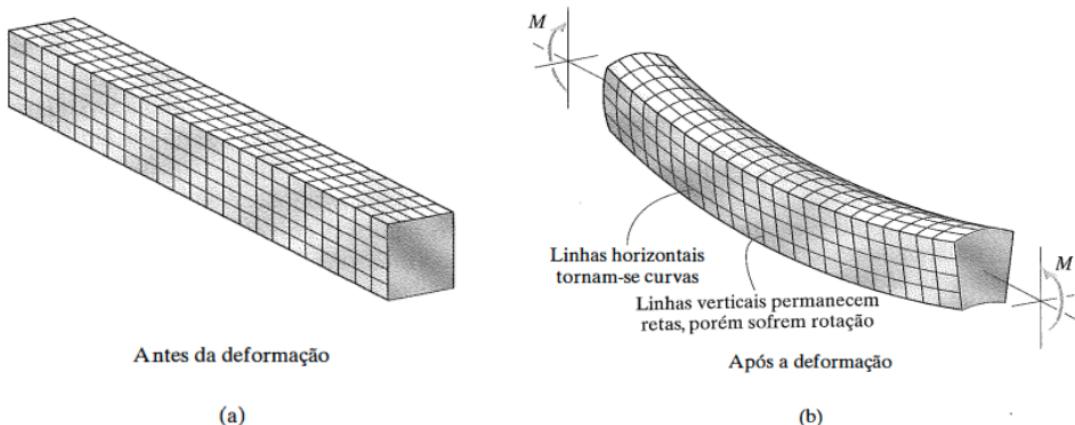
L : Comprimento da barra

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. Segundo (HIBBEKER, 2010) “O momento

fletor é causado pelas cargas externas que tendem a fletir o corpo em torno de um eixo que se encontra no plano da área.” e que nesse momento “tende a produzir uma variação linear da deformação normal no interior de uma viga”. A [Figura 4](#) mostra uma representação ilustrativa do efeito do momento fletor em uma viga.

Figura 4 – Representação do efeito da deflexão 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 ([HIBBELER, 2010](#)). Deve-se notar que assim como a barra em torção, a tensão, e eventualmente a deflexão presente será função da distância entre o ponto de interesse e o centro da área da seção transversal do material. A [Equação \(6\)](#) caracteriza a distribuição de tensão ao longo da seção do componente.

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

onde

M : Momento fletor

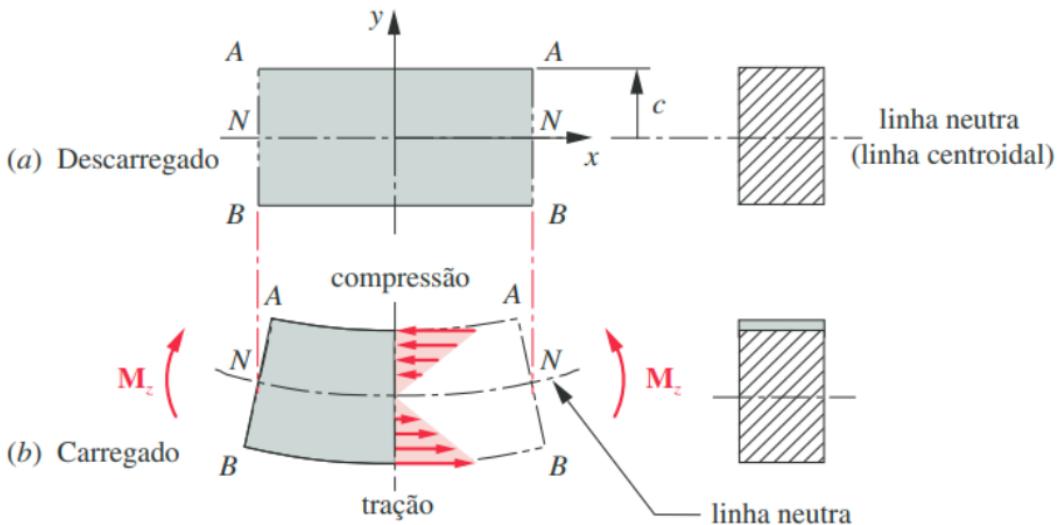
y : Distância entre limite da área e seu centróide

I : Momento de inércia da seção transversal

O valor de I é igual ao momento de inércia da seção do material sobre carga de flexão e a variável y representa a distância entre o centróide da área 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 inverso a este estará sob forças de compressão. Uma vez conhecido o módulo de elasticidade do material e a distribuição de tensão de na

10

Figura 5 – Deflexão e distribuição de tensão em uma sob flexão



Fonte: (NORTON, 2011)

seção de um corpo sob flexão, pode-se obter, utilizando a lei de hooke, os valores de deflexão causados pelas cargas de flexão.

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 deflexão nos componentes.

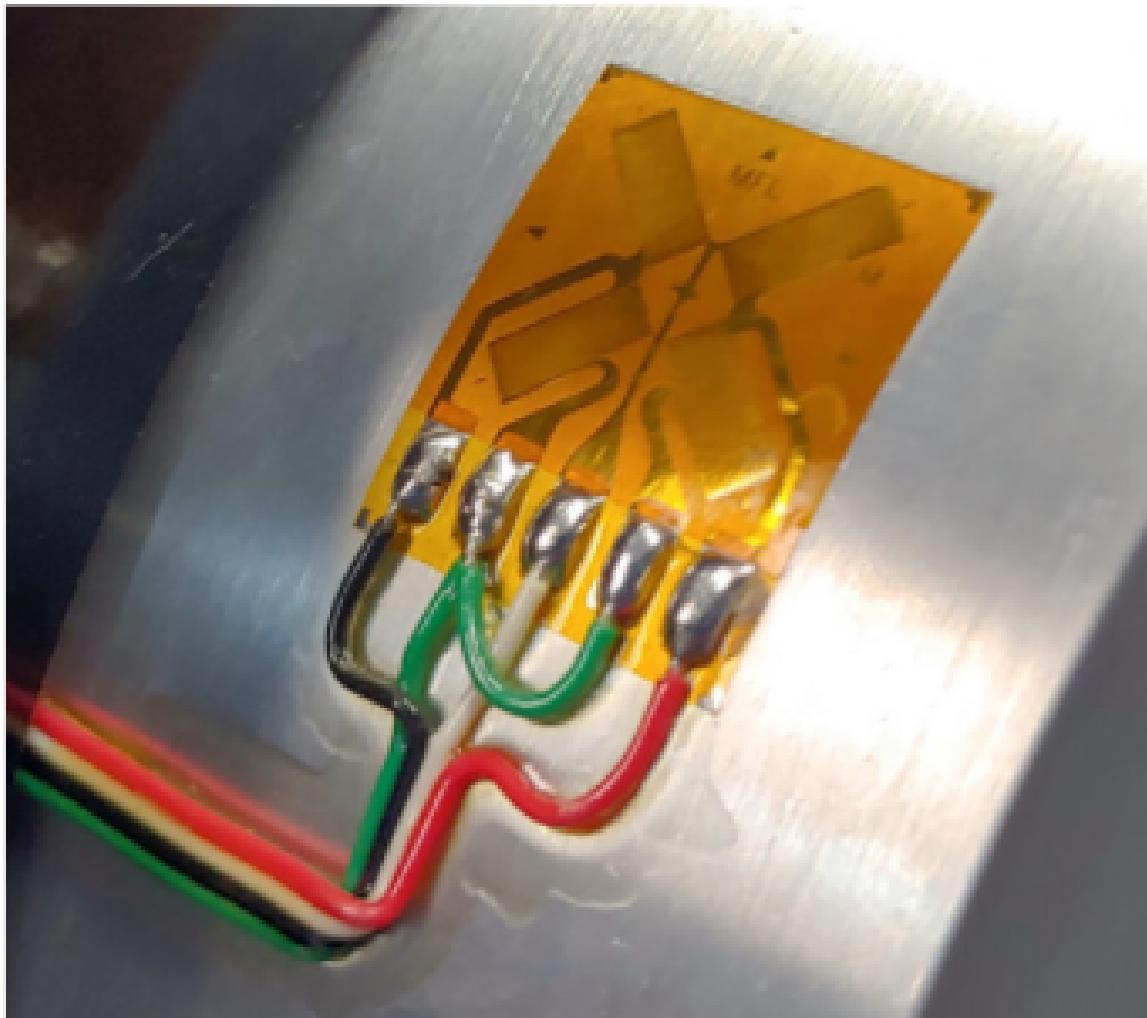
2.2 EXTENSOMETRIA

O extensômetro de resistência elétrica é o dispositivo mais utilizado para medir a deflexão 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 fortemente fixado a um corpo de um material em uma direção específica, 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 deflexão, é um valor especificado pelo fabricante, então, e a resistência nominal do extensômetro são valores especificados pelo fabricante do sensor, então medindo

Figura 6 – 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 (7) mostra uma relação entre a variação de resistência elétrica no extensômetro e os parâmetros repassados pelo fabricante.

$$K\varepsilon = \frac{\Delta R_s}{R_s} \quad (7)$$

sendo

K : Gage Factor

ε : Deformação no extensômetro

ΔR_s : Variação de resistência causada pela deformação

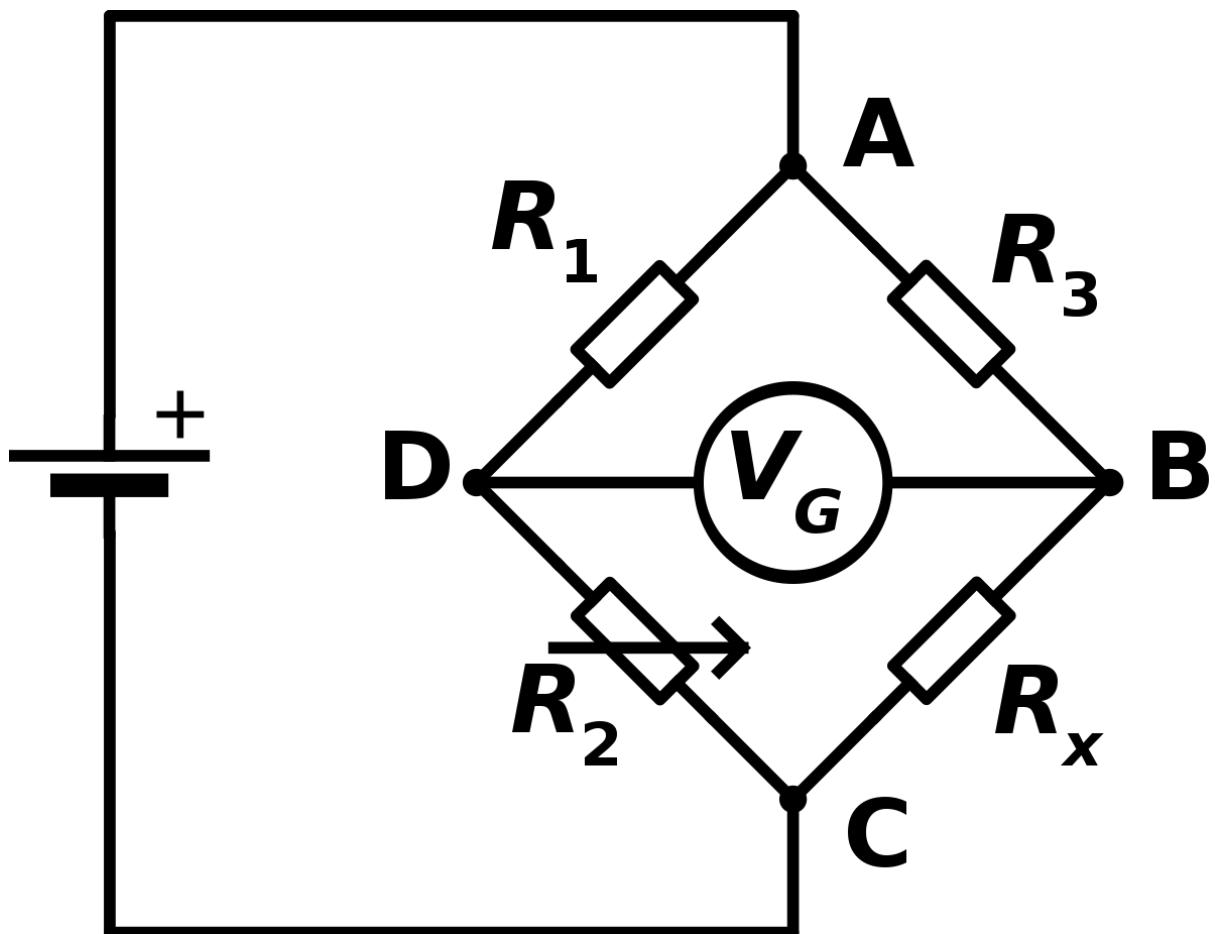
R_s : Resistência nominal do extensômetro

Porém, deve-se notar que os valores de deflexão 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 deflexão, devem ser utilizados artifícios de instrumentação como um circuito de ponte com a finalidade de detectar com maior variação as mudanças 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 capacitação sob condições tanto estáticas quanto transientes. Dentre diversos tipos de circuitos de ponte a ponte de Wheatstone, demonstrada na Figura 7 se demonstra como um dos tipos de circuito elétrico mais utilizado e facilita a leitura da variação de resistência de sensores que apresentam baixas variações de resistência elétrica na sua operação. (HOLLMAN, 2011)

Figura 7 – Ponte de Wheatstone



A ponte de Wheatstone é normalmente utilizada em comparações e medições de resistência elétrica que variam de 1Ω até $1 M\Omega$ (HOLLMAN, 2011).

Utilizando as leis de kirchhoff para analisar a saída de tensão entre os pontos B e D se obtém a Equação (8).

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (8)$$

onde

E : Tensão de saída da ponte

V : Tensão de excitação da ponte

R_i : Resistência nominal dos resistores da ponte

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 (9).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (9)$$

onde

V_{out} : Tensão de saída da ponte

V_{in} : Tensão de excitação da ponte

k : Gage factor

ε_i : Valor de deformação no extensômetro "i"

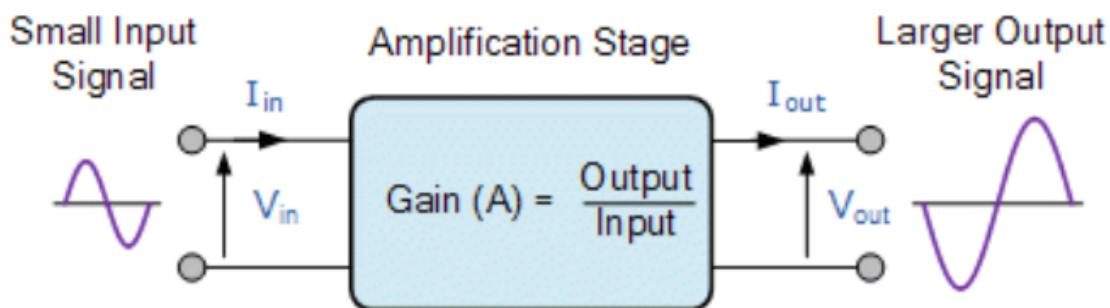
Circuitos de ponte se mostram de grande utilidade em experimentos práticos e são amplamente utilizados na medição da resistência de transdutores como extensômetros e outros tipos de sensores que convertem uma grandeza física em uma variação de resistência. Para medições estáticas, a tensão de saída do 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 não será de grande ordem de grandeza, 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).

Figura 8 – Princípio de funcionamento de um amplificador de sinal



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

O grau de amplificação de um amplificador pode ser dado pela [Equação \(10\)](#), que relaciona o sinal de entrada recebido pelo amp com o sinal de saída, que é lido pelo controlador.

$$Gain(A) = \frac{\text{input}}{\text{output}} \quad (10)$$

onde

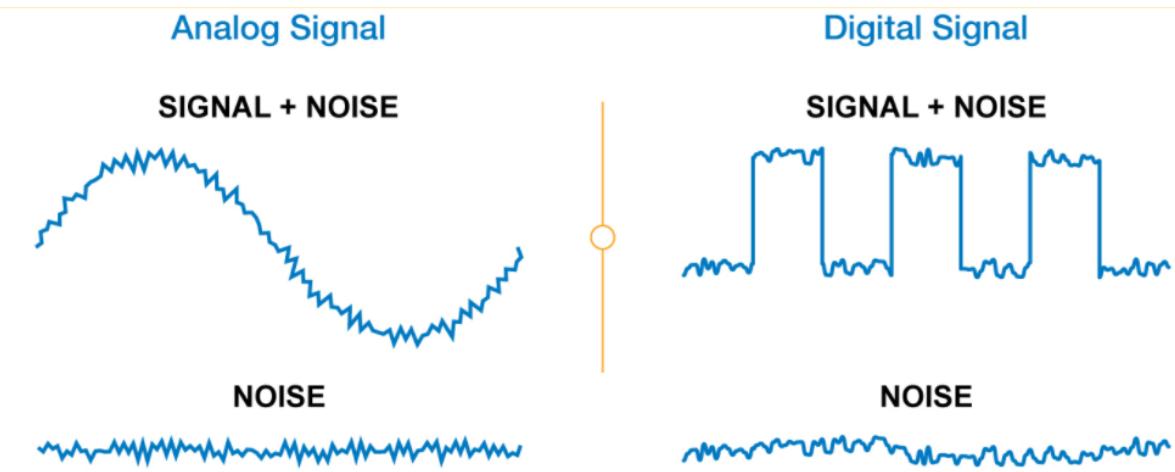
$Gain(A)$: Grau de amplificação do amplificador de sinal

input: Sinal de entrada

output: Sinal amplificado

Devido a efeitos aleatórios ou conhecidos ruídos característicos sempre estarão presentes em situações de tomada de medidas, esses ruídos 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 não resolve todos os problemas que podem ser encontrados, porém melhora significativamente o resultado de um experimento (HOLLMAN, 2011).

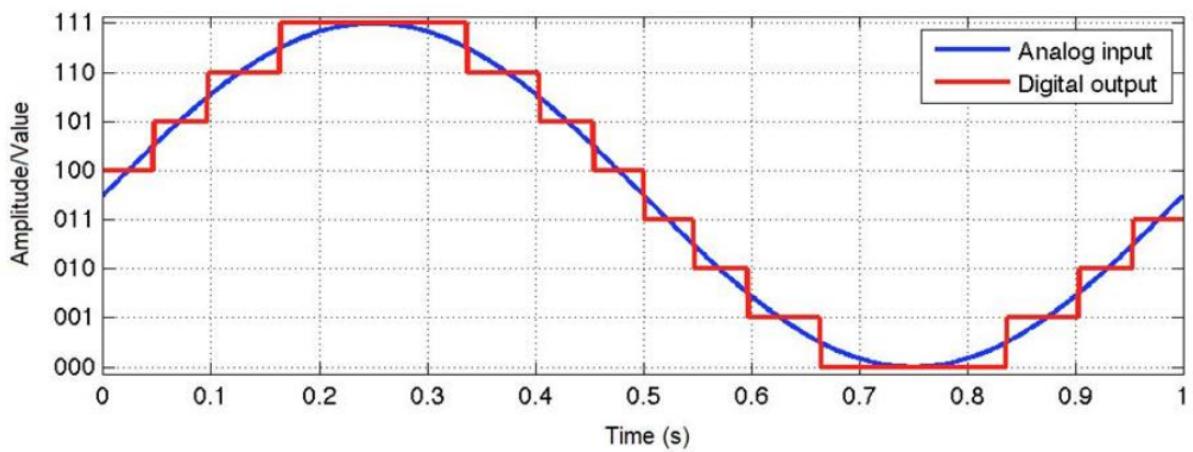
Figura 9 – Ilustração de ruidos presentes em sinais analógicos e digitais



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 Arduino, 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.

Figura 10 – 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

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. Uma faz razões para o tratamento de sinais de maneira digital é imunizar o sinal obtido do efeito de ruídos durante a transmissão, uma vez que definir

se um sinal obtido é de valor 1 ou 0 é muito mais fácil do que definir se é um valor entre os infinitos possíveis em um meio contínuo (HOLLMAN, 2011).

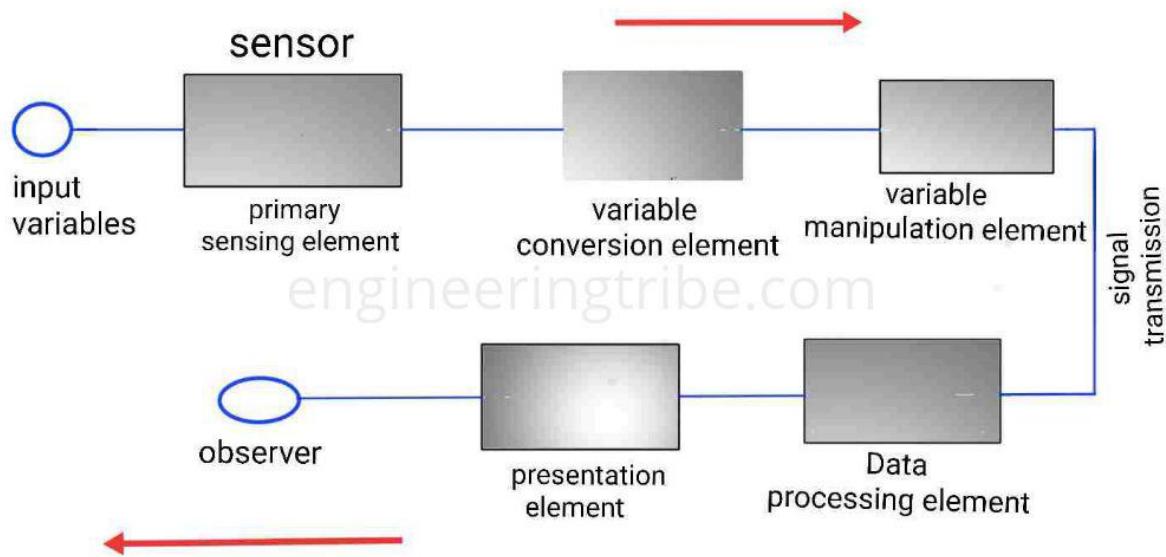
Com a finalidade de não ser perdidas informações no momento de conversão de um sinal do meio analógico para a forma digital, deve ser seguido o teorema sampling que estipula que a taxa de leitura de um sinal de maneira digital necessita ser pelo menos duas vezes o valor da frequência desse sinal no meio 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 partes, um estágio de detecção da medida física, um estágio intermediário de amplificação, filtragem e conversão de sinal e um estágio final, que engloba a obtenção e processamento do sinal por um dispositivo de controle (HOLLMAN, 2011).

Figura 11 – Diagrama de blocos dos estágios de um sistema de medição



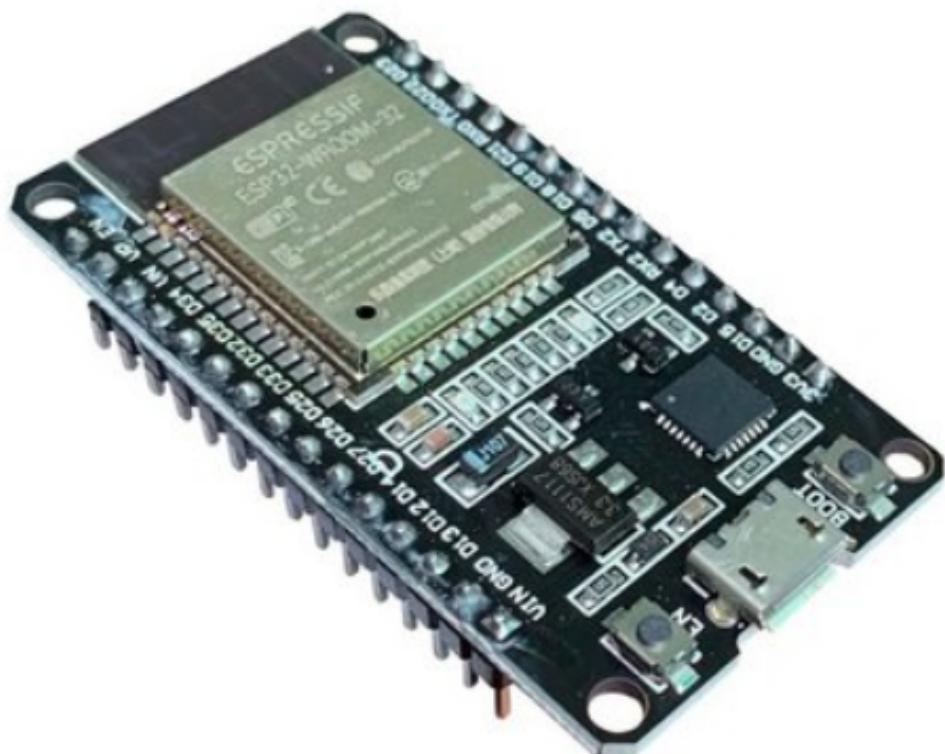
Fonte: <https://www.engineeringtribe.com/2020/09/generalized-measurement-system.html>
acesso em fev 2022

Uma medição é considerada estática quando a grandeza física analisada não apresenta mudanças no tempo, como uma viga sobre uma carga constante de flexão.

se essa viga é sujeita a um tipo de vibração, ou a um carregamento cíclico, então não pode mais se considerar o sinal estático ([HOLLMAN, 2011](#)).

Para desenvolver o sistema de controle e obtenção do sinal foi utilizado a plataforma de desenvolvimento ESP32. Suas principais vantagens sobre a plataforma Arduino, de menor preço e mais amplamente utilizada, é devido ao fato de que o ESP32 apresenta em sua construção módulos de comunicação sem fio bluetooth e wifi integrados, o que reduz o tamanho do dispositivo e o torna mais barato em aplicações que necessitam de comunicação wireless ([ESPRESSIF, 2022](#)).

Figura 12 – Controlador ESP32



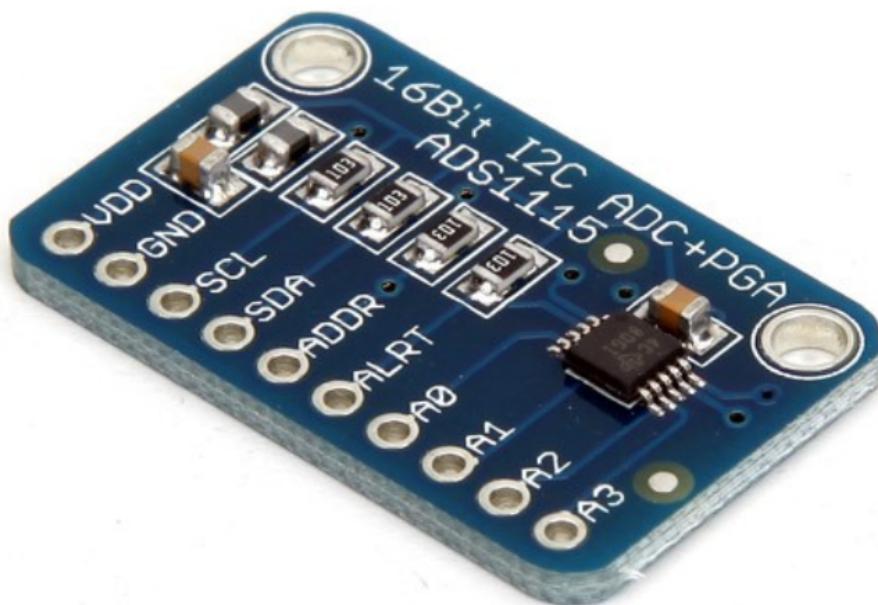
Fonte: [amazon.com](https://www.amazon.com)

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 conversor analógico digital de precisão com resolução de 16 bits, desenvolvido com precisão e facilidade de implementação em mente. O módulo é capaz de converter sinais obtidos na frequência de até 860 amostras por segundo, e oferece um amplificador de sinal que pode obter sinais tão baixos quanto na faixa de

$\pm 256m$, o que permite pequenos sinais serem medidos com alta resolução ([INSTRUMENTS, 2022](#)).

Figura 13 – Amplificador de sinal ADS1115



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

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.

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 \(11\)](#) obtém o valor médio para uma medição experimental consistente de diversas leituras.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^x a_i \quad (11)$$

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 \(12\)](#), se mostra como um bom indicador da situação dos desvios, e consequentemente da exatidão de um sistema de medição.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{n}} \quad (12)$$

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 \(13\)](#).

$$\chi^2 = \sum \frac{(observed - expected)^2}{expected} \quad (13)$$

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 se caracteriza como uma linguagem de programação humanamente amigável, básica e de fácil leitura e entendimento. Que permite ao usuário a utilização de extensões e pacotes com funções de conveniência para resolver a maior parte dos problemas computacionais encontrados ([TIM HALL, 2010](#)).

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 em uma minimização do tempo de processamento de um programa se comparado com utilizando funções nativas de python ([DEVELOPERS, P., 2022](#)). As principais funções utilizadas são demonstradas na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – Funções do pacote NumPy utilizadas

Função	Descrição	Parâmetros de entrada	Parâmetros de saída
array	Cria um objeto do numpy	Lista python	Vetor ndarray
average	Obtem valor médio	Vetor ndarray	Valor médio
std	Obtém desvio padrão	Vetor ndarray	Valor desvio padrão
amax	Obtém valor máximo	Vetor ndarray	Valor máximo
amin	Obtém valor mínimo	Vetor ndarray	Valor mínimo

Fonte: O autor (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 ([DEVELOPERS, P., 2022](#)). 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. Então deve-se partir para a fase da análise dos dados nominais obtidos.

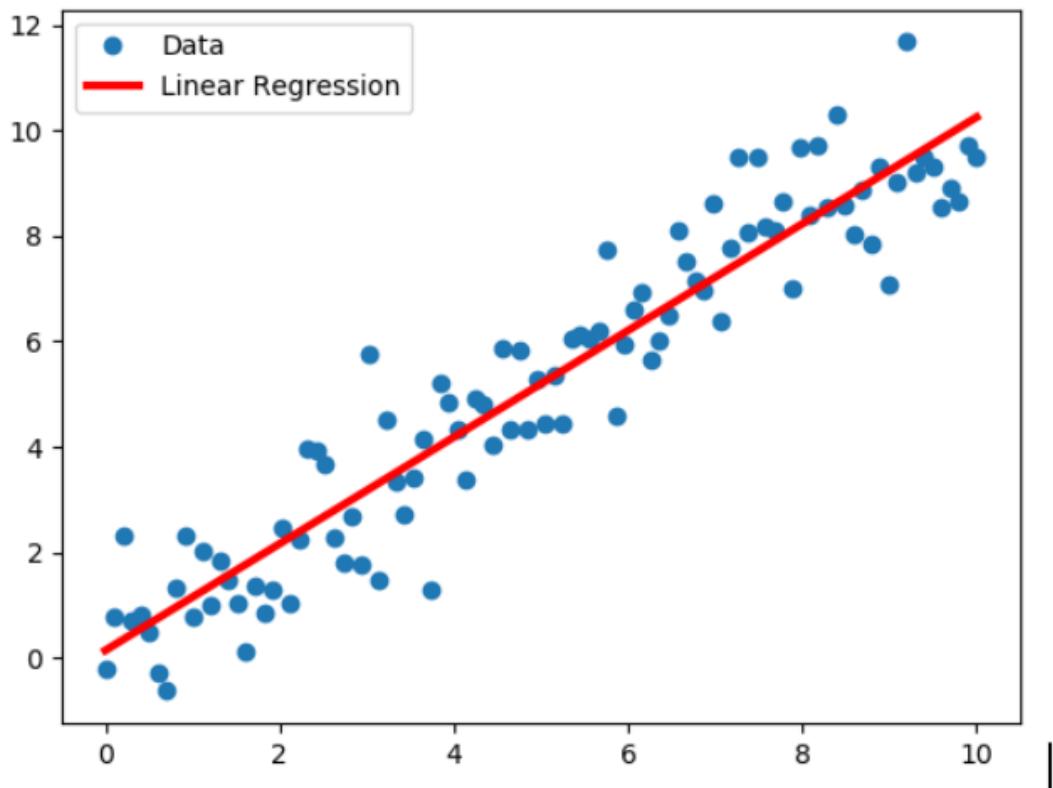
2.5.2 Análise dos valores nominais

Uma vez obtidos todos os valores nominais para cada situação experimental analisada, devem ser criadas representações gráficas da distribuição dos resultados obtidos para isso é utilizado o pacote scipy, que é uma coleção de algoritmos matemáticos e funções de conveniência, desenvolvidos em cima do pacote numpy. Ele proporciona ao usuário funções e classes para manipulação e visualização de dados científicos. O

pacote `scipy` se mostra como um forte competidor aos ambientes de desenvolvimento mais comumente utilizados, como o Matlab, Scilab e o Octave (DEVELOPERS, S., 2022).

A principal visualização a ser obtida no experimento é o gráfico de distribuição de cargas aplicados pelos valores de tensão da ponte de Wheatstone obtidos, então, utilizando o método de minimização dos quadrados, pode-se obter os parâmetros básicos que descrevem uma função matemática em que os erros entre valores observados do experimento e os estimados sejam o mínimo o possível.

Figura 14 – Regressão linear



Fonte: www.researchgate.net/figure/Linear-Regression-model-sample-illustration_fig3_340271573_acessoem_fev2022

O gráfico de regressão linear dos dados experimentais é obtido utilizando a função `scipy.linalg.regress` do pacote `scipy`.

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 5](#). (NEDIP-UFSC, 2021).

Figura 15 – Etapas da metodologia PRODIP



Fonte: ([NEDIP-UFSC, 2021](#))

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)

Embásado no argumento indicado por Back em sua obra, a metodologia seguida segue as etapas apresentadas na ([NEDIP-UFSC, 2021](#)), porém, nem todas as ferramentas e sub etapas apresentadas serão rigorosamente seguidas. O autor ignorou ou simplificou algumas etapas, principalmente nas fases informacional e conceitual do projeto, uma vez que o objetivo deste trabalho não é o de gerar um produto pronto para 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, cronograma, orçamento riscos etc. Nessa etapa são definidas as ideias do problema e produto, então é feito um mapeamento tecnológico, em que, segundo a metodologia "são organizadas as informações do mercado, produto e tecnologia ao longo do tempo. Essas informações são correlacionadas e servem de base para estabelecer o plano de produtos."([NEDIP-UFSC, 2021](#))

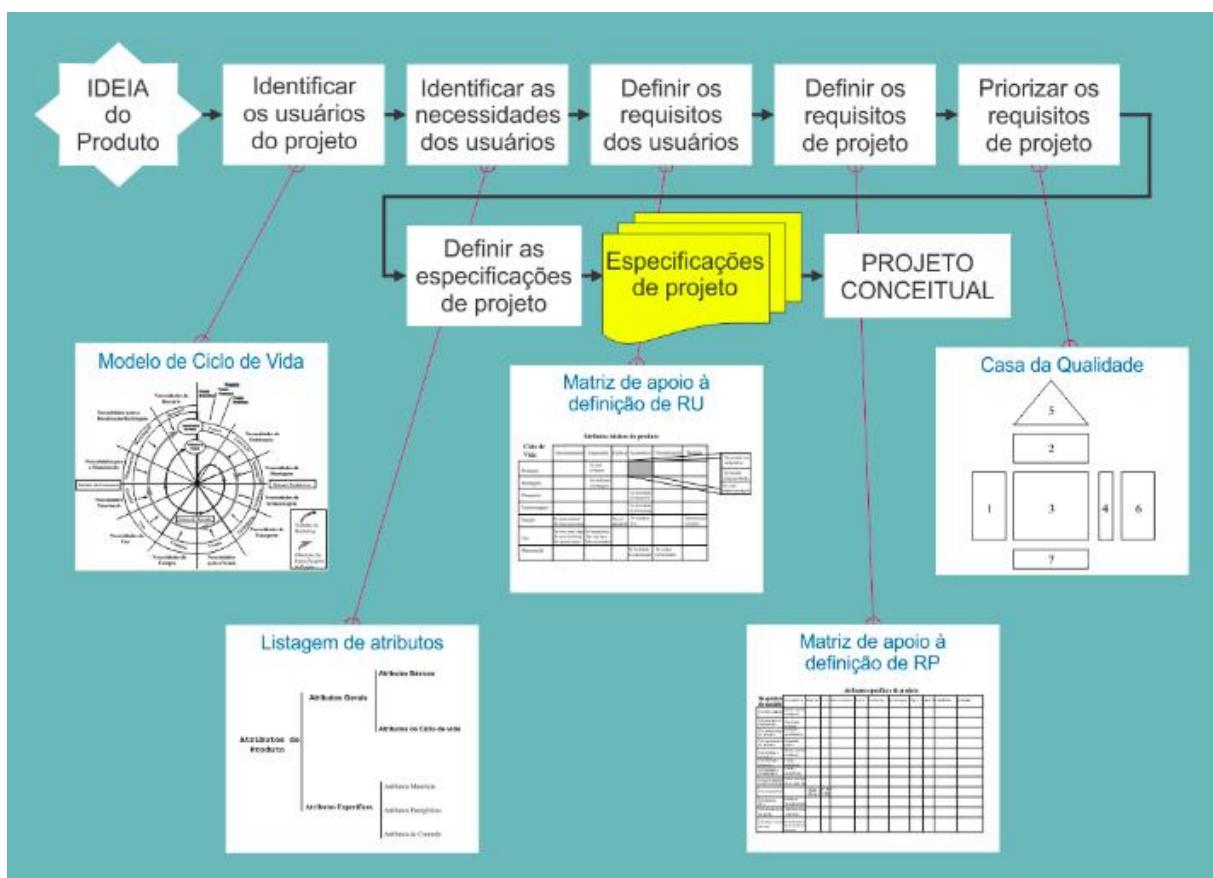
2021).

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 informational

Nessa fase o objetivo é o estabelecimento das especificações de projeto, as quais irão orientar o desenvolvimento técnico do produto. O principal método empregado é a matriz da casa da qualidade da metodologia 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, 2021](#))

Figura 16 – Etapas do projeto informacional



Fonte: ([NEDIP-UFSC, 2021](#))

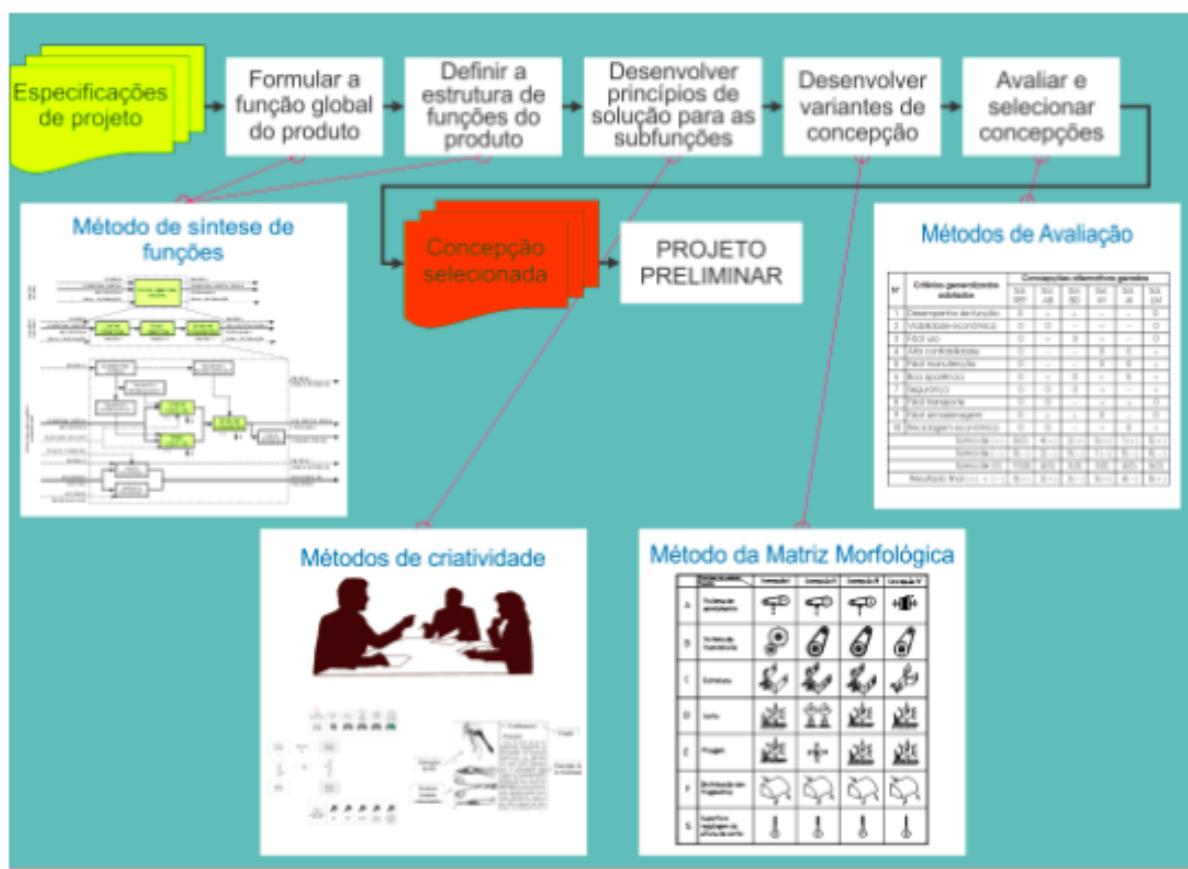
No final do projeto informacional, é obtido de maneira clara e organizada quais

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.

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. Dentre as ferramentas utilizadas nessa fase se destacam matriz síntese de funções, matriz morfológica e matrizes multicritério de seleção. ([NEDIP-UFSC, 2021](#))

Figura 17 – Etapas do projeto conceitual



Fonte: ([NEDIP-UFSC, 2021](#))

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](#))

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.

3.1 PLANEJAMENTO DO PROJETO

O problema a ser solucionado é o de difícil acesso e altos custos para a obtenção de dados de deformação em tempo real. 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, de alta performance, ou para aplicações muito específicas, estes foram ignorados devido a altos custos ou baixa flexibilidade em relação ao dispositivo proposto. Dos produtos encontrados, três se mostraram mais semelhantes ao que será desenvolvido.

A empresa Isso disponibiliza em sua loja virtual Dois dispositivos para controle e obtenção de dados, denominados dmi tcr 44es, mostrado na [Figura 18](#), e dmi tcr 88es. Segundo o fabricante esses dispositivos são utilizados para aplicações de acionamentos e telemetria remota, e são indicados para uso em automações residenciais e industriais, a única diferença observada entre os dois modelos são o número de entradas e saídas de sinais que o dispositivo possui. ([ISSO, 2022a](#))

Outro dispositivo, denominado Bridge101A, mostrado na [Figura 19](#), fabricado pela empresa Madgetech foi encontrado, segundo a empresa é um data logger compacto que mede e armazena valores de tensões elétricas, e é normalmente utilizado com extensômetros, células de carga e outras sensores de baixa tensão, e que o dispositivo é utilizado para calcular com precisão parâmetros de tensão, torque, deformação e pressão ao longo do tempo. ([MADGETECH, 2022](#))

A [Tabela 2](#) 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 em qualquer aplicação que necessite a utilização desse tipo de dispositivo. Muitos deles necessitam ainda de programas para programação e utilização proprietários e que ainda tem custos adicionais para utilização. O dispositivo desenvolvido neste

Figura 18 – Datalogger DMI TCR 44es

Fonte: ([ISSO, 2022a](#))

Tabela 2 – Benchmarking 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
Faixa de tensão de leitura	Não disponibilizado	Não disponibilizado	$\pm 30 \text{ mV}$
Faixa de preço	R\$1100,00	R\$1300,00	R\$2800,00

Fonte: O autor 2022

trabalho tem como objetivo um preço consideravelmente menor que os analisados e programável e utilizável utilizando tecnologias gratuitas e 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, Sciedirect e Google Scholar, utilizando como palavras-chave “Dynamic, Torque, Shaft, Sensor, Strain, Gauge”, os principais obtidos

Figura 19 – Dispositivo Bridge101A



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

são apresentados nessa subseção.

Um artigo desenvolvido por ([NIEDWOROK, 2014](#)) relata o desenvolvimento e aplicação de um sistema de sensoriamento de torque em tempo real em um eixo cardan 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.

(NURPRASSETIO *et al.*, 2018) 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. 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.

(GHARGHAN; NORDIN; ISMAIL, 2017) 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 e porcentagem de erro médio absoluto para a validação do sistema.

(SILVA; VARANIS; MERELES, 2017) 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.

Com os dados do mapeamento tecnológico e da revisão dos trabalhos científicos recentes, é elaborado um documento de escopo base do projeto com o conceito de funcionamento básico e uma descrição dos componentes necessários e seus respectivos preços, esse escopo está disponível no apêndice A.

3.2 PROJETO INFORMACIONAL

3.3 ELABORAÇÃO DO CONCEITO

3.4 PREPARAÇÃO DO PROTÓTIPO

3.5 VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

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, 2017), uma introdução aos principais tópicos

Tabela 3 – Características de ganho para o ADS1115

Ganho	Faixa de leitura	Resolução
2/3x	$\pm 6.144V$	$1bit = 0.1875mV$
1x	$\pm 4.096V$	$1bit = 0.125mV$
2x	$\pm 2.048V$	$1bit = 0.0625mV$
4x	$\pm 1.024V$	$1bit = 0.03125mV$
8x	$\pm 0.512V$	$1bit = 0.015625mV$
16x	$\pm 0.256V$	$1bit = 0.0078125mV$

Fonte: O autor 2022

dessa metodologia e eventuais diferenças entre os dispositivos utilizados nos dois trabalhos para cada tópico é feita nessa seção.

Os ensaios realizados envolvem a leitura de extensômetros colados em corpos de prova sobre ação de cargas específicas. Um dispositivo de análise de cargas de flexão e um para cargas em torção foram desenvolvidos e produzidos por ([MINELA, 2017](#)), os mesmos dispositivos foram utilizados para este trabalho.

3.5.1 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. A imagem mostra o projeto do dispositivo desenvolvido por ([MINELA, 2017](#)).

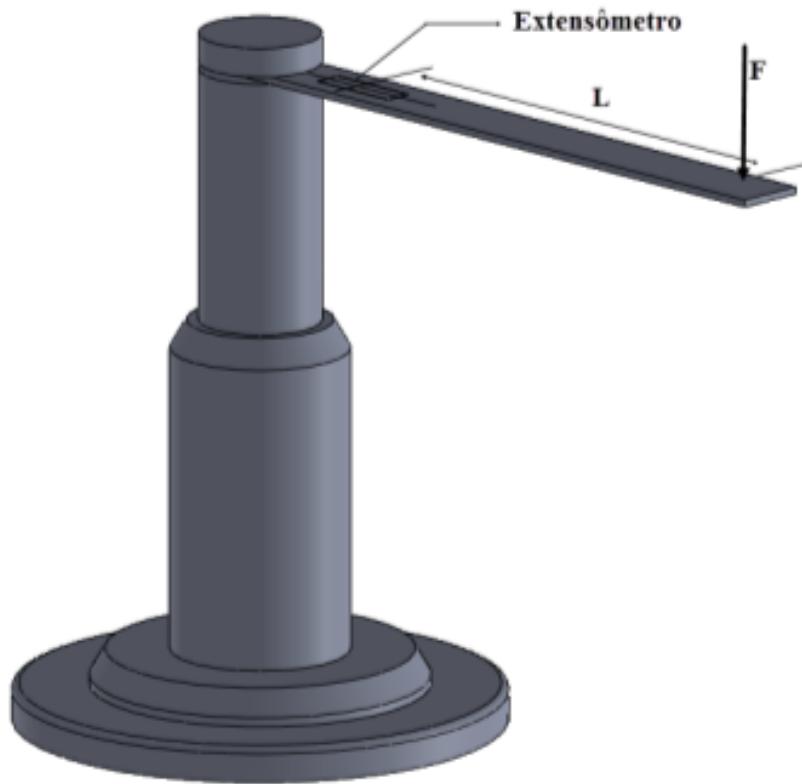
Na viga é colado um extensômetro unidimensional para obter os dados de deformação, as propriedades do extensômetro utilizado são mostradas na [Tabela 4](#).

Tabela 4 – 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°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](#))

Figura 20 – Dispositivo de ensaio de flexão



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

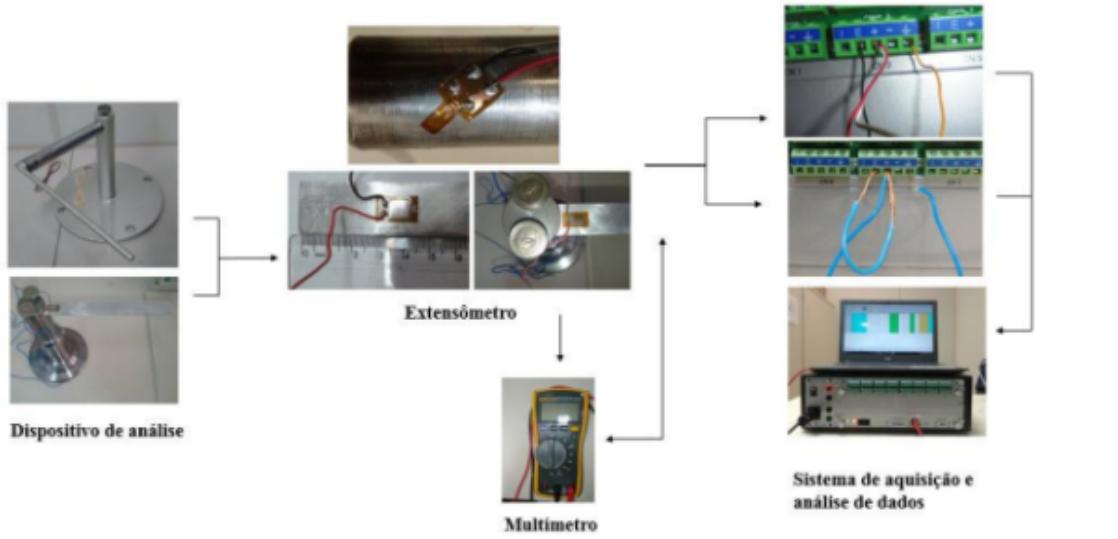
As cargas são aplicadas na extremidade livre da viga a distância de 150mm entre o centro do extensômetro e o ponto de aplicação da carga. Com a finalidade de se obter os valores de deformação causados pela aplicação de cada carga, cada trabalho utiliza-se de um sistema de medição diferente, apresentado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

3.5.2 Sistemas de medição

Tanto o sistema de medição utilizado em ([MINELA, 2017](#)) quanto o utilizado para o desenvolvimento deste trabalho seguem o mesmo princípio de funcionamento.

O sistema de medição utilizado por ([MINELA, 2017](#)) é composto por um dispositivo de obtenção de dados ADS2002, desenvolvido e fabricado pela LYNX Tecnologia, que é conectado a um computador. O ADS2002 obtém os dados gerados pelo sensor e os envia ao computador via conexão ethernet. O computador utiliza o software AQ-Dados para conexão com o ADS2002, calibração e aferição dos extensômetros, e o

Figura 21 – Sistema de medição utilizado por ([MINELA, 2017](#))



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

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.

Figura 22 – Sistema de medição utilizando o LINX ADS2002

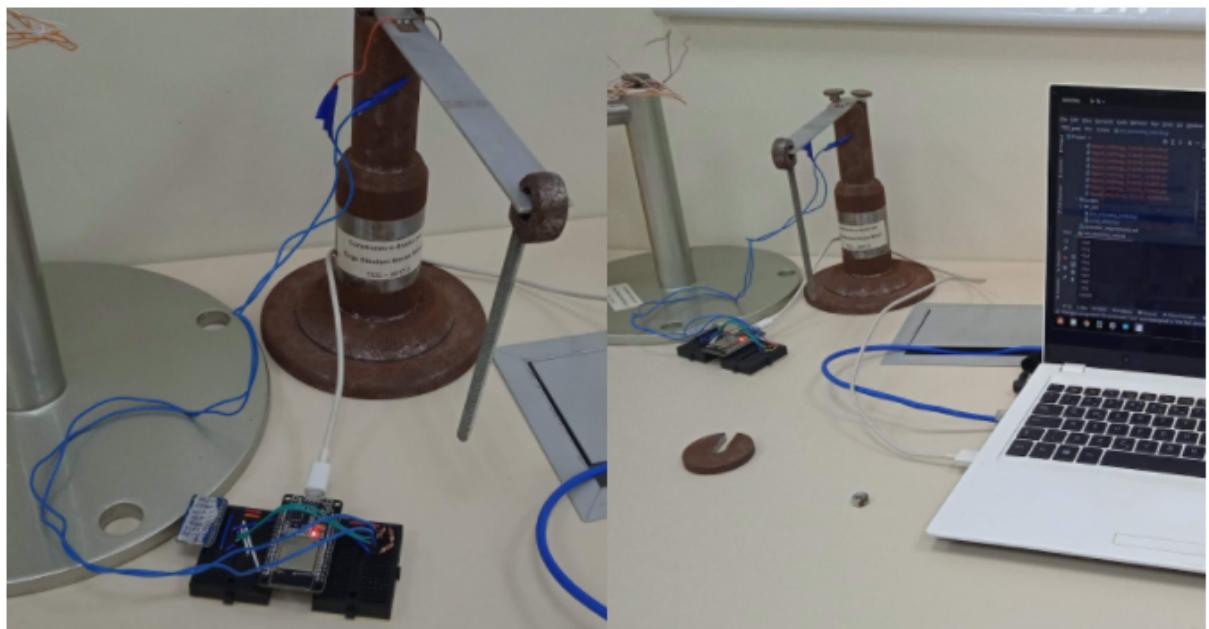


trados como valores de formação, ao invés de tensões, é feita utilizando a [Equação \(14\)](#) que define um valor de fator de engenharia em função do fator gage FG da resistência média do extensômetro RM , resistência de calibração RC , que é disponibilizada pelo fabricante.

$$VE = \left(\frac{1}{FG} \left(\frac{RM}{RM+RC} \right) \right) \quad (14)$$

O sistema de medição utilizando o protótipo desenvolvido pelo autor é feito pela conexão entre o controlador ESP 32 e o computador via o software desenvolvido em python para realizar a transferência dos dados obtidos entre o controlador e o computador em tempo real.

Figura 23 – Protótipo do dispositivo desenvolvido conectado com o extensômetro no dispositivo de flexão



Fonte: O autor 2021

A calibração do dispositivo desenvolvido pelo autor é feita utilizando os sinais resultantes da aplicação de duas massas distintas conhecidas. Os valores nominais obtidos nos sinais alimentam a [Equação \(15\)](#) que é utilizada para converter os valores discretos obtidos em bits pelo amplificador de sinal para um valor de gradeza física desejado.

$$F(W) = \frac{\text{output}_{high} - \text{output}_{low}}{W_{high} - W_{low}} (W - W_{low}) + \text{output}_{low} \quad (15)$$

onde

$F(W)$: Função de calibração

W : Valor nominal do sinal

W_{high} : Carga de calibração de massa alta

W_{low} : Carga de calibração de massa baixa

$output_{high}$: Valor nominal do sinal obtido pela aplicação da carga alta

$output_{low}$: Valor nominal do sinal obtido pela aplicação da carga baixa

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.

3.5.3 Cargas aplicadas

(MINELA, 2017) utiliza pesos com massas pré definidas apoiadas utilizando um fuso de fixação para aplicação das cargas no ponto “F” no dispositivo, mostrado na figura. Dentre as massas utilizadas por (MINELA, 2017) 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 foram substituídas as massas não encontradas 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 5.

Tabela 5 – 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 %
Peso 5	495,25 g	496,22 g	0,20 %

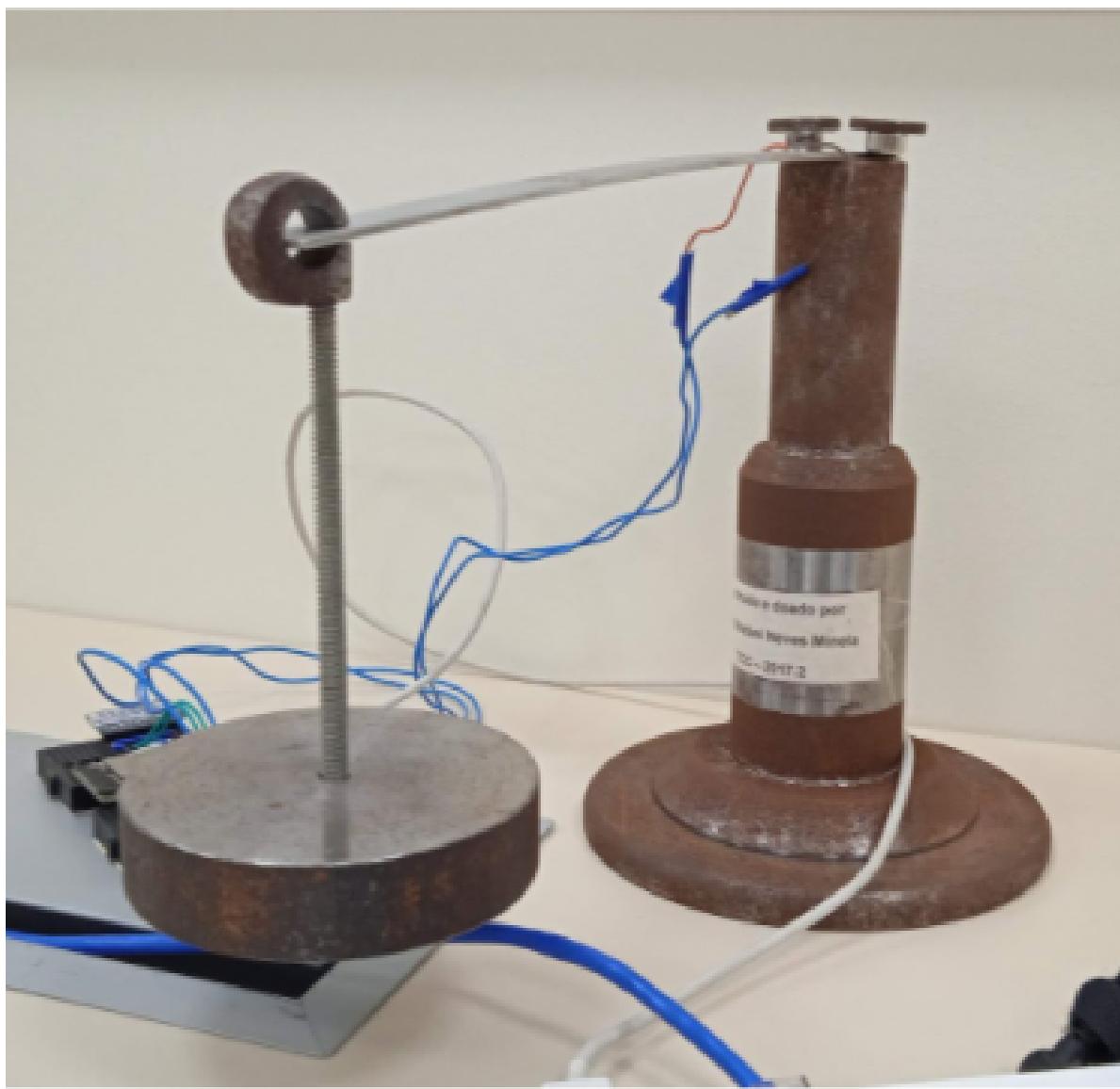
Fonte: O autor 2022

As massas da porca e do “peso 1” utilizados em (MINELA, 2017) 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 mostra a viga de alumínio defletida pela aplicação da carga do "peso 3".

Figura 24 – 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 obtém valores em bits proporcionais a carga aplicada no experimento.

Os valores obtidos em bits são posteriormente convertidos em valores de carga, ou de deformação utilizando uma função de transferencia obtida pelo método de calibração.

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

Nota-se que os valores obtidos sem cargas aplicadas não se igualam a valores nulos, isso acontece pois existe um diferencial de tensão entre os pólos da ponte de Wheatstone, esse diferencial pode ser causado por imprecisão nos valores de resistência dos resistores utilizados, fatores térmicos na execução do experimento que alteram a resistência do extensômetro, ou imprecisões ou ruídos que podem estar presentes nos componentes eletrônicos do amplificador de sinal utilizado.

Uma vez que o sinal sem cargas aplicadas apresenta ruídos e flutuações indesejadas, foi decidido a utilização de duas cargas para calibração do dispositivo, os sinais obtidos pela aplicação das cargas são mostradas nas [Figura 26](#) e [Figura 27](#)

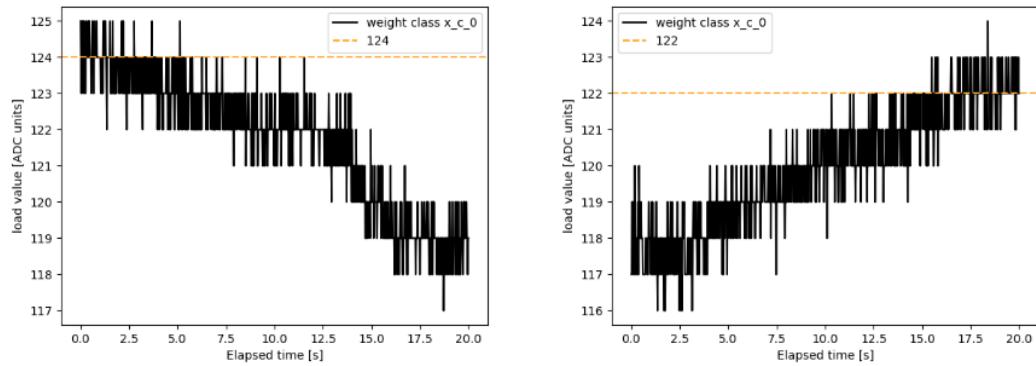
4.1.2 Ruídos presentes

Os ruídos presentes no sinal se mostram de maior criticidade nas situações em que menores cargas são aplicadas.

4.1.3 Valores nominais

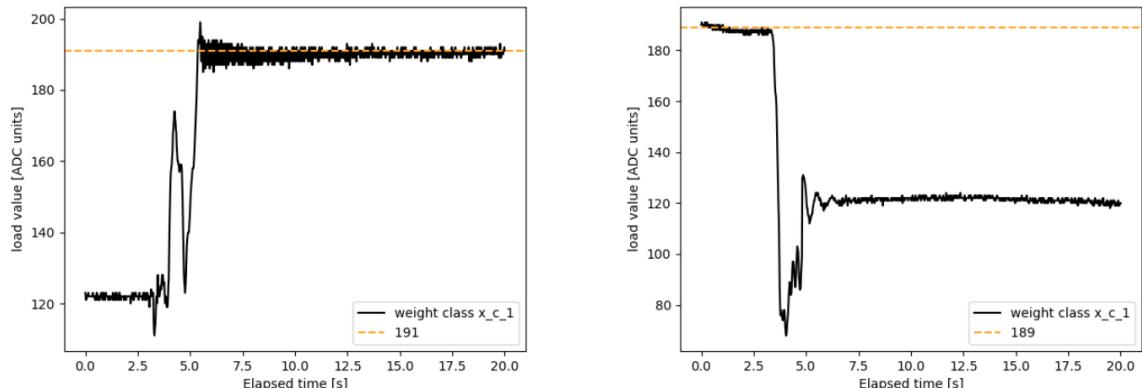
A [Figura 28](#) mostra os valores nominais de deformação para cada leitura da zona intermediária de cada sinal para cada combinação de cargas realizadas na execução do experimento, assim como o valor médio das amostras para cada combinação e o desvio padrão dos dados na zona intermediária de cada sinal como avaliação dos ruídos presentes.

Figura 25 – Sinal obtido sem a aplicação de cargas no dispositivo



Fonte: O autor 2022

Figura 26 – Sinal obtido pela aplicação da cargas de calibração baixa

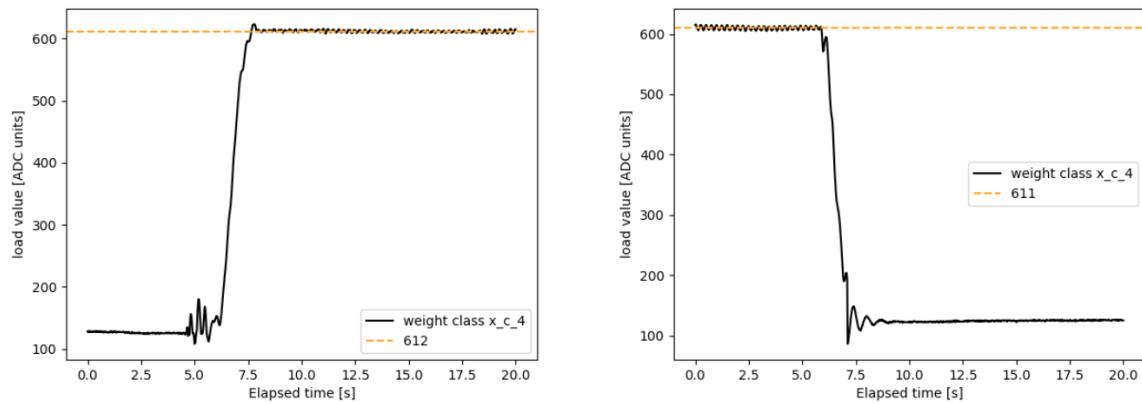


Fonte: O autor 2022

4.2 FUNÇÕES DE AJUSTE

A resolução das funções de minimização de mínimos quadrados é feita utilizando a função `stats.linregress` do pacote SciPy, foram analisados a influência da utilização de quantidade e diferentes pontos nos indicadores obtidos na criação da função de ajuste, conforme a [Figura 29](#).

Figura 27 – Sinal obtido pela aplicação da cargas de calibração alta



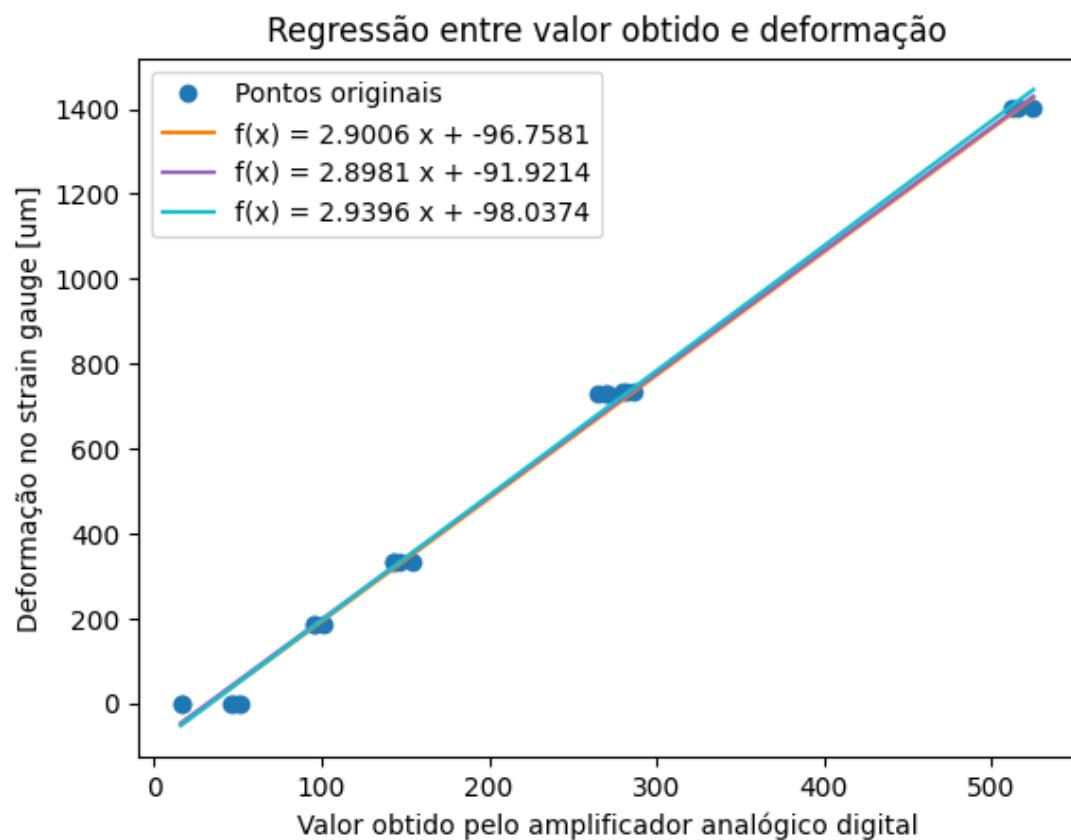
Fonte: O autor 2022

Figura 28 – Amostras e valores médios obtidos

Carga aplicada	Valor das amostras	Valor médio das amostras
weight_value	Valor obtido	Valor médio
0.14 kg	179	185.57
0.14 kg	182	
0.14 kg	196	
0.25 kg	318	320.93
0.25 kg	318	
0.25 kg	327	
0.5469 kg	672	680.60
0.5469 kg	684	
0.5469 kg	686	
0.5494 kg	715	723.15
0.5494 kg	721	
0.5494 kg	733	
1.05 kg	1388	1403.82
1.05 kg	1397	
1.05 kg	1426	

Fonte: O autor 2022

Figura 29 – Função de ajuste de dados de deformação em relação aos valores obtidos no amplificador



Fonte: O autor 2022

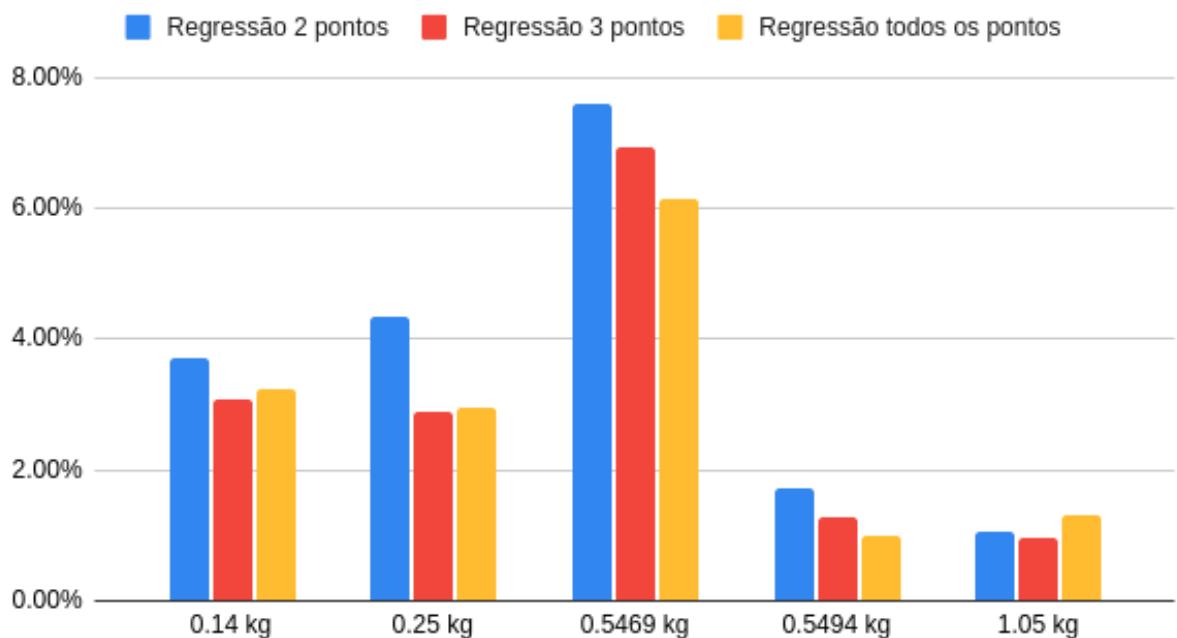
Figura 30 – Comparação dos valores convertidos usando diferentes funções de ajuste

Carga aplicada	Valor das amostras			Valor médio das amostras		
	Reg 2 pts	Reg 3 pts	Reg all pts	Reg 2 pts	Reg 3 pts	Reg all pts
0.14 kg	179	183	181	185.57	190.16	188.09
0.14 kg	182	186	184			
0.14 kg	196	201	199			
0.25 kg	318	323	322	320.93	325.41	325.27
0.25 kg	318	323	322			
0.25 kg	327	331	331			
0.5469 kg	672	676	681	680.60	684.77	689.79
0.5469 kg	684	688	693			
0.5469 kg	686	691	696			
0.5494 kg	715	720	725	723.15	727.28	732.90
0.5494 kg	721	725	731			
0.5494 kg	733	737	743			
1.05 kg	1388	1392	1407	1403.82	1407.37	1422.74
1.05 kg	1397	1401	1416			
1.05 kg	1426	1430	1445			

Fonte: O autor 2022

Figura 31 – Erro entre valores encontrados com a função de ajuste e os valores esperados pela análise analítica

Erro para qnt de pontos da regressão



Fonte: O autor 2022

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Lipsum me [31-33]

REFERÊNCIAS

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

DEVELOPERS, NumPy. **Documentação NumPy.** English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://numpy.org/doc/stable/>>.

DEVELOPERS, Pandas. **Documentação Pandas.** English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://pandas.pydata.org/docs/>>. Citado na p. [32](#).

DEVELOPERS, SciPy. **Documentação SciPy.** English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://docs.scipy.org/doc/>>. Citado na p. [33](#).

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. [29](#).

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. [41](#).

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais.** 7. ed. São Paulo (SP): Pearson Education do Brasil, 2010. ISBN 9788576053736. Citado nas pp. [15](#), [17–22](#).

HOLLMAN, Jack Philip. **Experimental methods for engineers.** 8. ed. [S.I.]: McGraw - Hill, 2011. Citado nas pp. [22–26](#), [28–31](#).

INSTRUMENTS, Texas. **ADS1115 Datasheet.** English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/292735/TI/ADS1115.html>>. Citado na p. [30](#).

ISSO. **Documentação DMI TCR 44es.** English. Jan. 2022. Disponível em: <https://isso.digital/produtos/48/dmi_tcr_44es>. Citado nas pp. [38](#), [39](#).

ISSO. **Documentação DMI TCR 88es.** English. Jan. 2022. Disponível em: <https://isso.digital/produtos/48/dmi_tcr_88es>.

MADGETECH. **Documentação Bridge101A.** English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://www.madgetech.com/products/bridge101a/>>. Citado nas pp. 38, 40.

MINELA, Sthefani Neves. **EXTENSOMETRIA: ESTUDO E APLICAÇÃO.** 2017. Diss. (Mestrado) – UFSC, Joinville. Citado nas pp. 16, 41–44, 46, 49.

NEDIP-UFSC. **Metodologia PRODIP.** Dez. 2021. Disponível em: <<https://nedip.ufsc.br/sessao/modelo-prodip-1>>. Citado nas pp. 34–36.

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. 40.

NORTON, Robert. **Machine design : an integrated approach.** Edição: 4th. 4. ed. Boston: Prentice Hall, 2011. ISBN 9780136123705. Citado nas pp. 18–20, 22.

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, 41.

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. 41.

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. 31.