



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.

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina.
Arquivo compilado às 11:47h do dia 11 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.

62 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

CDU 02:141:005.7

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 \LaTeX 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	19
Figura 2	–	Exemplo de diagrama tensão-deformação	20
Figura 3	–	Deflexão de uma barra sob carga de tração	21
Figura 4	–	Representação do efeito da deflexão em um eixo sob torção . . .	22
Figura 5	–	Deflexão e distribuição de tensão em um eixo sob torção	23
Figura 6	–	Representação do efeito da deflexão em uma viga sob flexão . .	24
Figura 7	–	Deflexão e distribuição de tensão em uma sob flexão	25
Figura 8	–	Extensômetro fixado á um corpo de prova	26
Figura 9	–	Ponte de wheatstone	28
Figura 10	–	Princípio de funcionamento de um amplificador de sinal	29
Figura 11	–	Ilustração de ruídos presentes em sinais analógicos e digitais . .	30
Figura 12	–	Representação gráfica de um sinal analógico em forma digital . .	31
Figura 13	–	Diagrama de blocos dos estágios de um sistema de medição . . .	32
Figura 14	–	Controlador ESP32	33
Figura 15	–	Amplificador de sinal ADS1115	34
Figura 16	–	Regressão linear	36
Figura 17	–	Etapas da metodologia PRODIP	38
Figura 18	–	Principais componentes de um transdutor de torque industrial . .	39
Figura 19	–	Etapas do projeto informacional	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Funções do pacote NumPy utilizadas	35
----------	---	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
abnTeX	ABsurdas Normas para TeX

LISTA DE SÍMBOLOS

Γ	Letra grega Gama
Λ	Lambda
ζ	Letra grega minúscula zeta
\in	Pertence

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
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 um eixo em torção	22
2.1.3	Deformação de uma viga em flexão	24
2.2	SENSORIAMENTO DE DEFORMAÇÕES	26
2.2.1	Ponte de Wheatstone	27
2.3	OBTENÇÃO DE SINAIS	29
2.4	SISTEMAS DE MEDIÇÃO	31
2.5	ANÁLISE DOS SINAIS OBTIDOS	32
2.5.1	Ambiente de desenvolvimento computacional Python	34
2.5.2	Análise dos valores nominais	35
2.6	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETO DE PRODUTO	37
3	METODOLOGIA	38
3.1	METODOLOGIA DE PROJETO DE PRODUTO	38
3.1.1	Fase de planejamento	38
3.1.1.1		39
3.1.1.2		40
3.1.2	Projeto Informacional	41
3.1.3	Projeto Conceitual	42
3.1.4	Projeto Preliminar	42
3.1.5	Projeto Detalhado	42
3.2	METODOLOGIA DO EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO	42
4	RESULTADOS	43
4.1	RESULTADOS	43
4.1.1	Resultados	43
4.1.1.1		43
5	DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO	44
6	EXPERIMENTO	45

7	RESULTADOS	46
8	CONCLUSÕES	47
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE A – PÁGINA NÃO GERADA	52
A.1	SOME ENCODING TESTS	53
A.1.1	(encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, base- line: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)	53
A.1.1.1	(encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)	53
A.1.1.1.1	(encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)	53
	ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO	56
A.1	ENGLISH GUIDELINES FOR PUBLICATION	56
	ANEXO B – ANEXO EXEMPLO	61
B.1	SOME ENCODING TESTS	61
B.1.1	(encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, base- line: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)	61
B.1.1.1	(encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)	61
B.1.1.1.1	(encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)	62

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, (Hibbeler) 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 (Hibbeler) “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 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, conseqüentemente 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 desenvolvimento 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 Stefani (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 a fim de 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 às equações (1) e (2) de balanço estático originadas da segunda lei de newton.

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

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

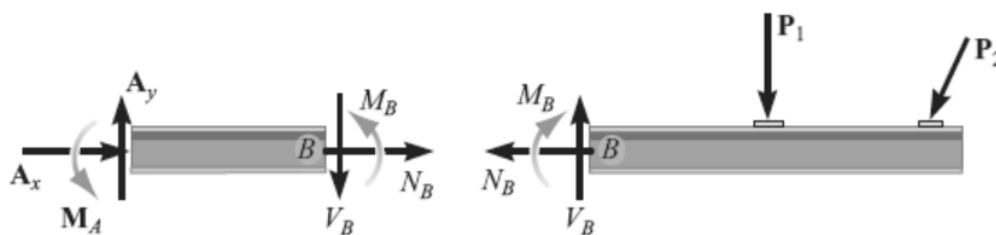
Onde:

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() apresenta uma representação gráfica da atuação de forças internas em um material:

Figura 1 – Forças internas atuando em um corpo em equilíbrio



Fonte: (HIBBELER, 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 (1) (NORTON, 2011).

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

sendo

ε : TBD

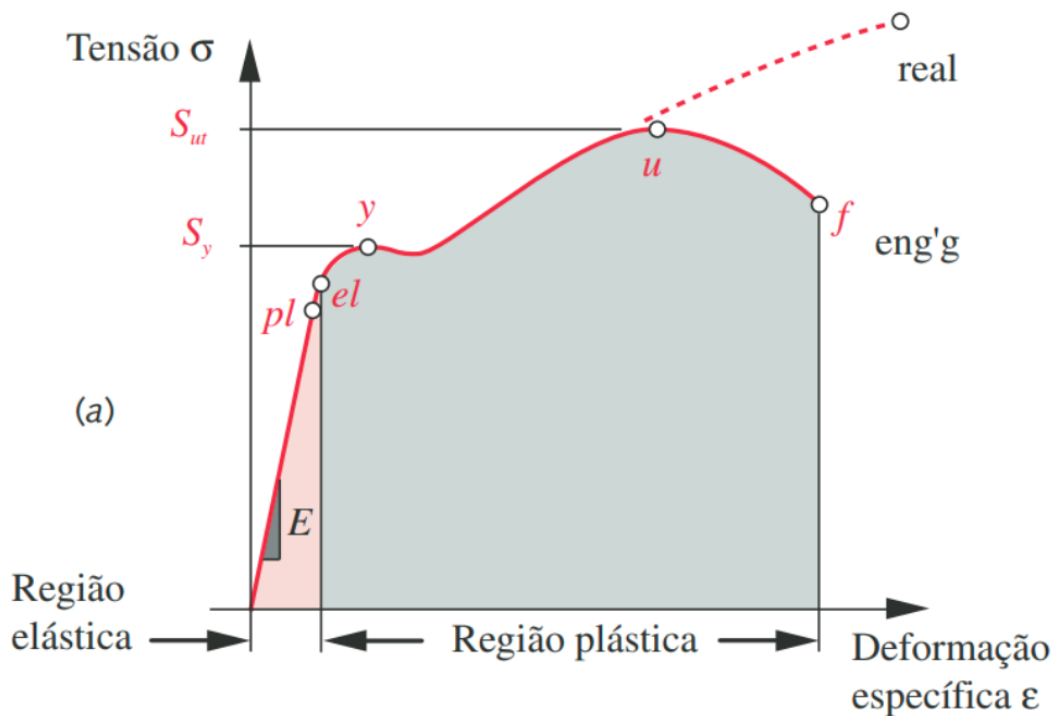
l : TBD

l_0 : TBD

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 (HIBBELER, 2010). Um exemplo de diagrama tensão-deformação é mostrado na figura ().

Analisando 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).

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

sendo

σ : TBD

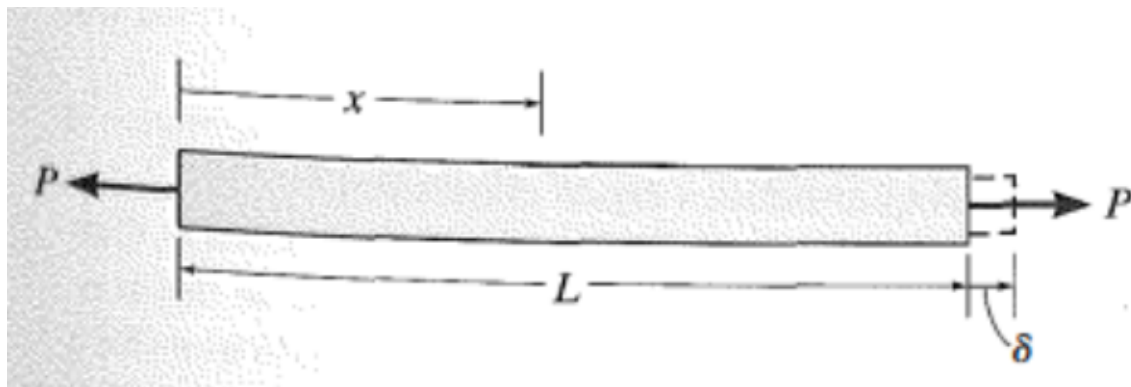
E : TBD

ϵ : TBD

A variável E da equação da Lei de Hooke é igual 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 ().

Figura 3 – Deflexão de uma barra sob carga de tração



Fonte: (HIBBELER, 2010)

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

sendo

δ : TBD

P : TBD

A : TBD

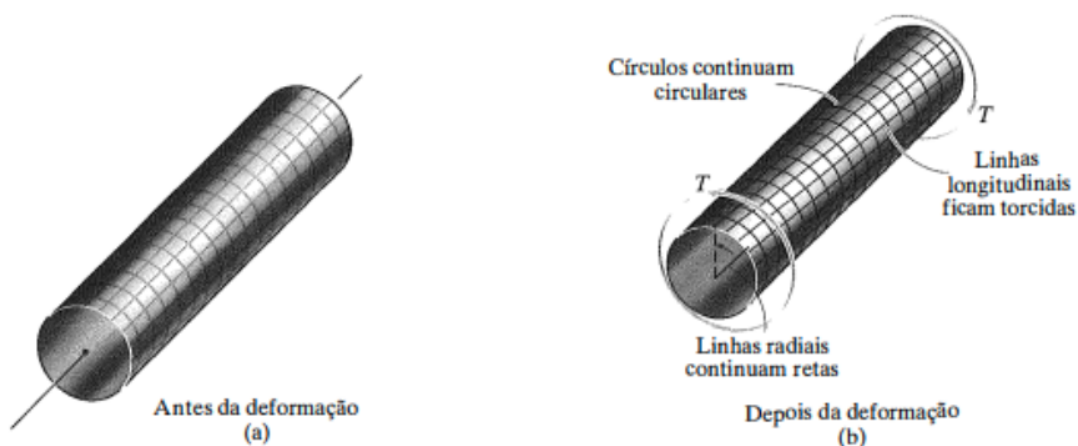
L : TBD

Para outros tipos de carregamentos também são notados valores de deformação relativos às cargas aplicadas, os principais utilizados no desenvolvimento do experimento são introduzidos nas subseções abaixo.

2.1.2 Deformação de um eixo em torção

Eixos normalmente são utilizados em situações em que as cargas torcionais são consideráveis, e caso estejam presentes cargas normais ou de flexão em sua utilização, e o material encontra-se em balanço estático, pode-se utilizar as mesmas equações de deformação da análise de barras e vigas. Norton afirma que “quando barras são solicitadas por um momento em relação ao seu eixo longitudinal, diz-se que estão sob torção, esse tipo de momento aplicado é denominado torque e esta situação é comum em eixos que transmitem potência.” A deformação vista no corpo de um eixo sob cargas de torção pura ao longo da sua seção transversal é ilustrada na figura().

Figura 4 – Representação do efeito da deflexão em um eixo sob torção



Fonte: (HIBBELER, 2010)

A Lei de Hooke para um corpo sob forças de torção é semelhante a mesma para o caso de um corpo em tração ou compressão, e é apresentada na equação (), porém o módulo presente dessa vez é denominado módulo de elasticidade transversal e segundo Norton “G pode ser definido em termos do módulo de elasticidade E e do coeficiente de Poisson ν (...) O coeficiente de Poisson (ν) é a razão entre a deformação específica lateral e longitudinal, sendo, para a maior parte dos metais, em torno de 0,3”. A tabela () apresenta os principais valores de coeficiente de poisson para diferentes materiais metálicos.

$$\tau = \frac{Gr\theta}{l_0} \quad (6)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (7)$$

sendo

τ : TBD

G : TBD

r : TBD

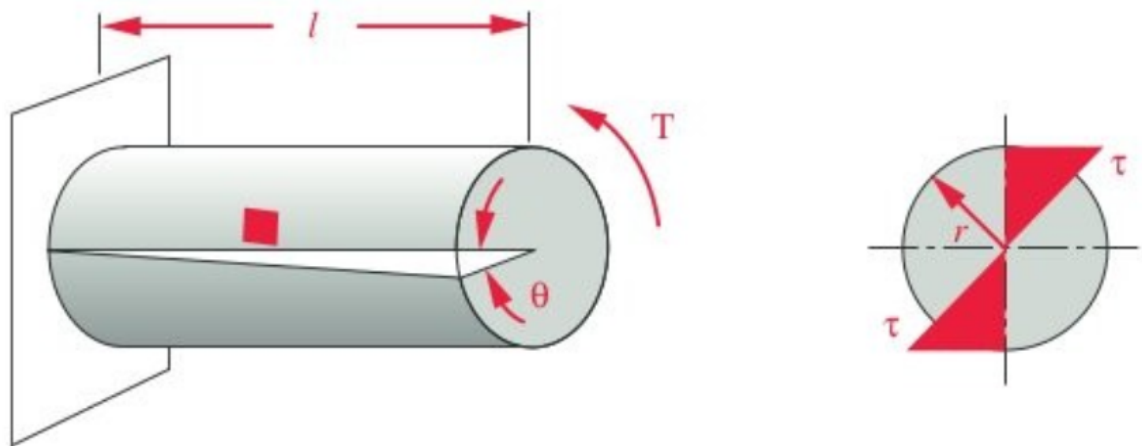
θ : TBD

l_0 : TBD

ν : TBD

Assim como visto na figura (anterior) é notado que a deformação nessa situação não se apresenta como aumento de comprimento do componente, como no caso da uma barra sob cargas axiais, mas por uma distribuição de deslocamentos angulares locais na direção radial da seção do eixo conforme se aumenta a dimensão de comprimento da análise das cargas internas como apresentado na figura(). A equação () é obtida da análise da Lei de Hooke para um eixo em torção.

Figura 5 – Deflexão e distribuição de tensão em um eixo sob torção



Fonte: (NORTON, 2011)

$$\theta = \frac{Tl}{GJ} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (9)$$

sendo

T : TBD

r : TBD

l : TBD

G : TBD

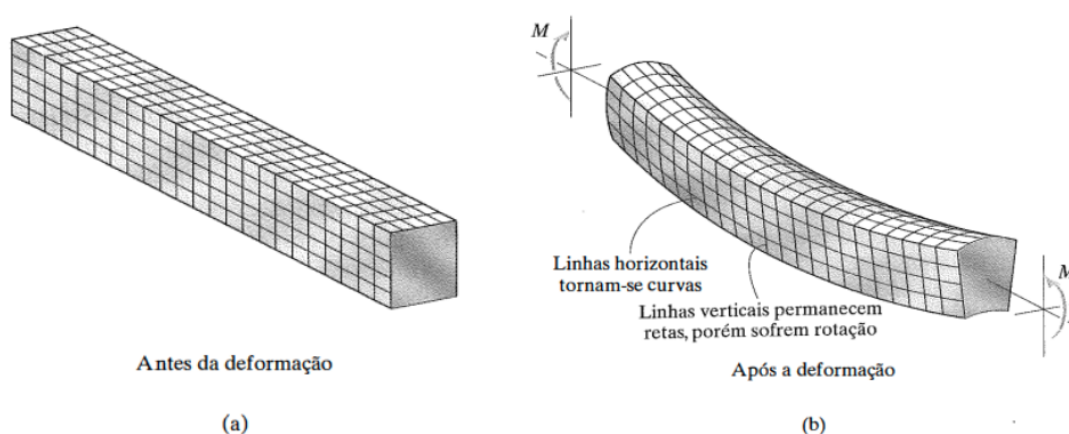
J : TBD

Assim como as barras em tração, as equações aqui apresentadas apenas consideram a operação do componente em regime de deformação elástico, logo os valores esperados de serão relativamente pequenos para materiais de engenharia.

2.1.3 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 Hibbeler “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() mostra uma representação ilustrativa do efeito do momento fletor em uma viga.

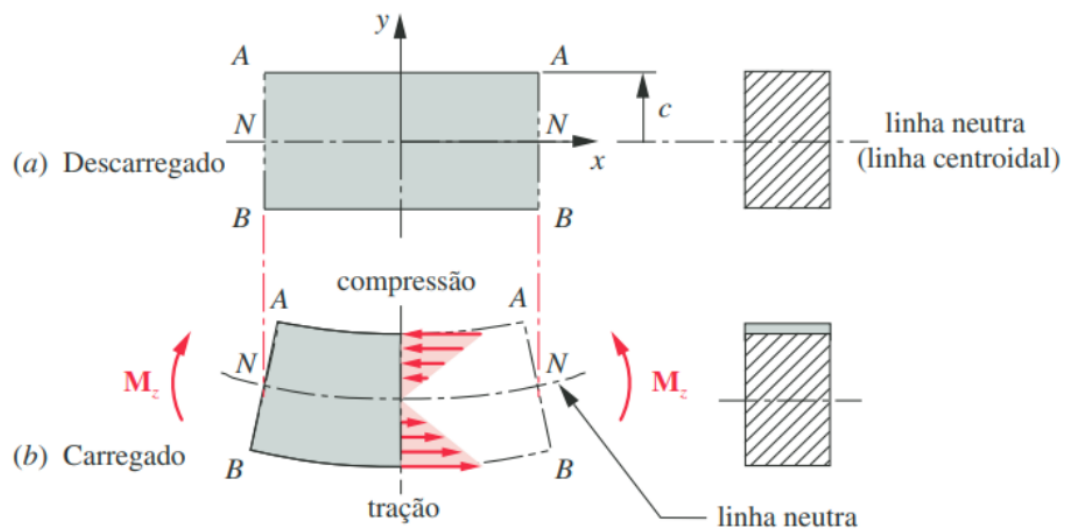
Figura 6 – Representação do efeito da deflexão em uma viga sob flexão



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() caracteriza a distribuição de tensão ao longo da seção do componente.

Figura 7 – Deflexão e distribuição de tensão em uma sob flexão



Fonte: (NORTON, 2011)

$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (10)$$

sendo

 M : TBD y : TBD I : TBD

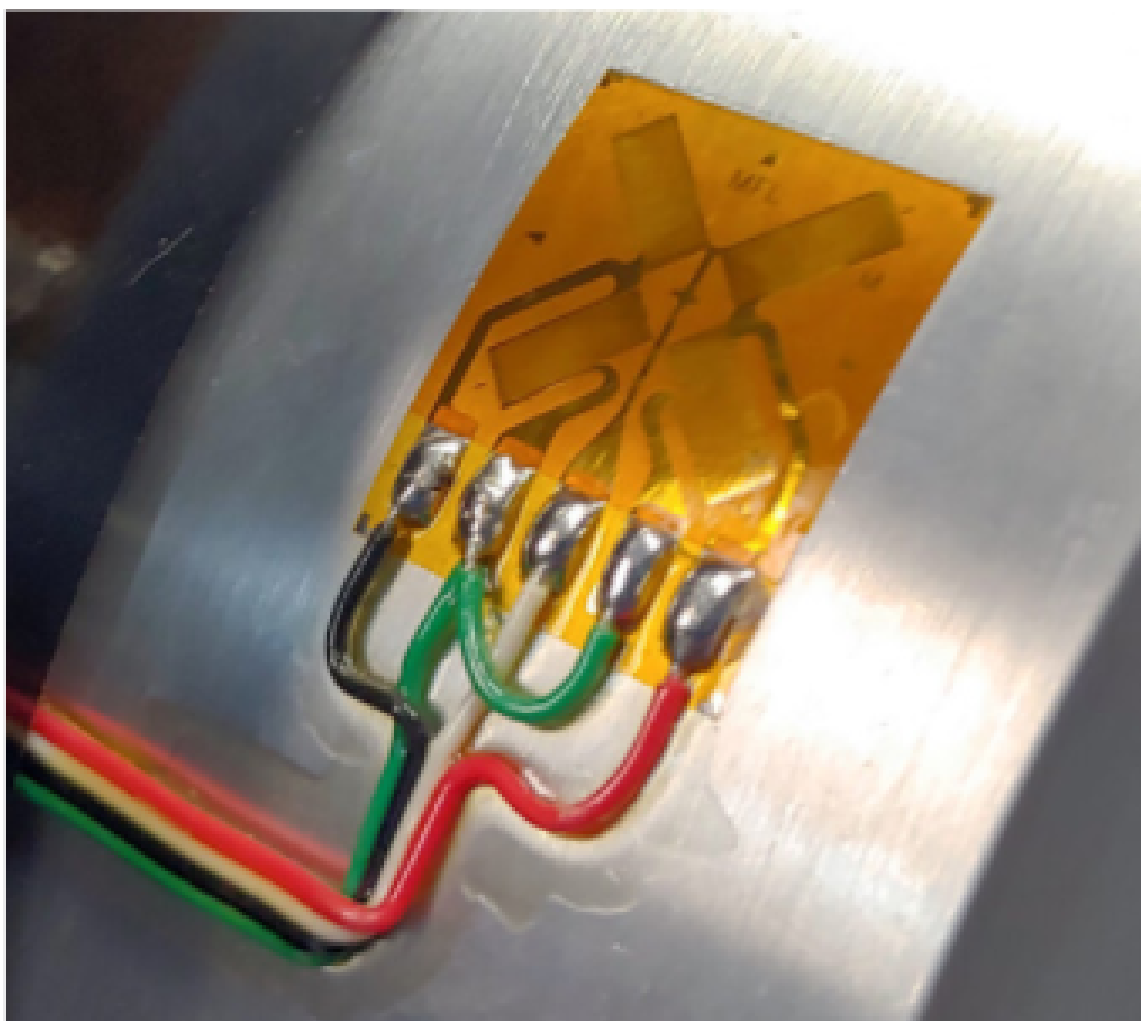
O valor de I é igual ao momento de inércia da seção do material sobre carga de flexão e a variável y representa a distância entre o centróide da área e o ponto de análise de tensão, deve-se notar que as tensões máximas para qualquer corpo em flexão sempre acontecerão na superfície do material, e que 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 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 SENSORIAMENTO DE DEFORMAÇÕES

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](#)).

Figura 8 – Extensometro fixado á um corpo de prova



Fonte: TBD

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 gage factor, parâmetro que especifica a relação entre a variação da resis-

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

$$K\varepsilon = \frac{\Delta R_s}{R_s} \quad (11)$$

sendo

K : TBD

ε : TBD

ΔR_s : TBD

R_s : TBD

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 capacitância sob condições tanto estáticas quanto transientes (HOLLMAN, 2011). Dentre diversos tipos de circuitos de ponte a ponte de wheatstone, demonstrada na figura() 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.

A ponte de wheatstone é normalmente utilizada em comparações e medições de resistência elétrica que variam de 1 ohm até 1 megaohm (HOLLMAN, 2011). Utilizando as leis de kirchhoff para analisar a saída de tensão entre os pontos B e D se obtém a equação ().

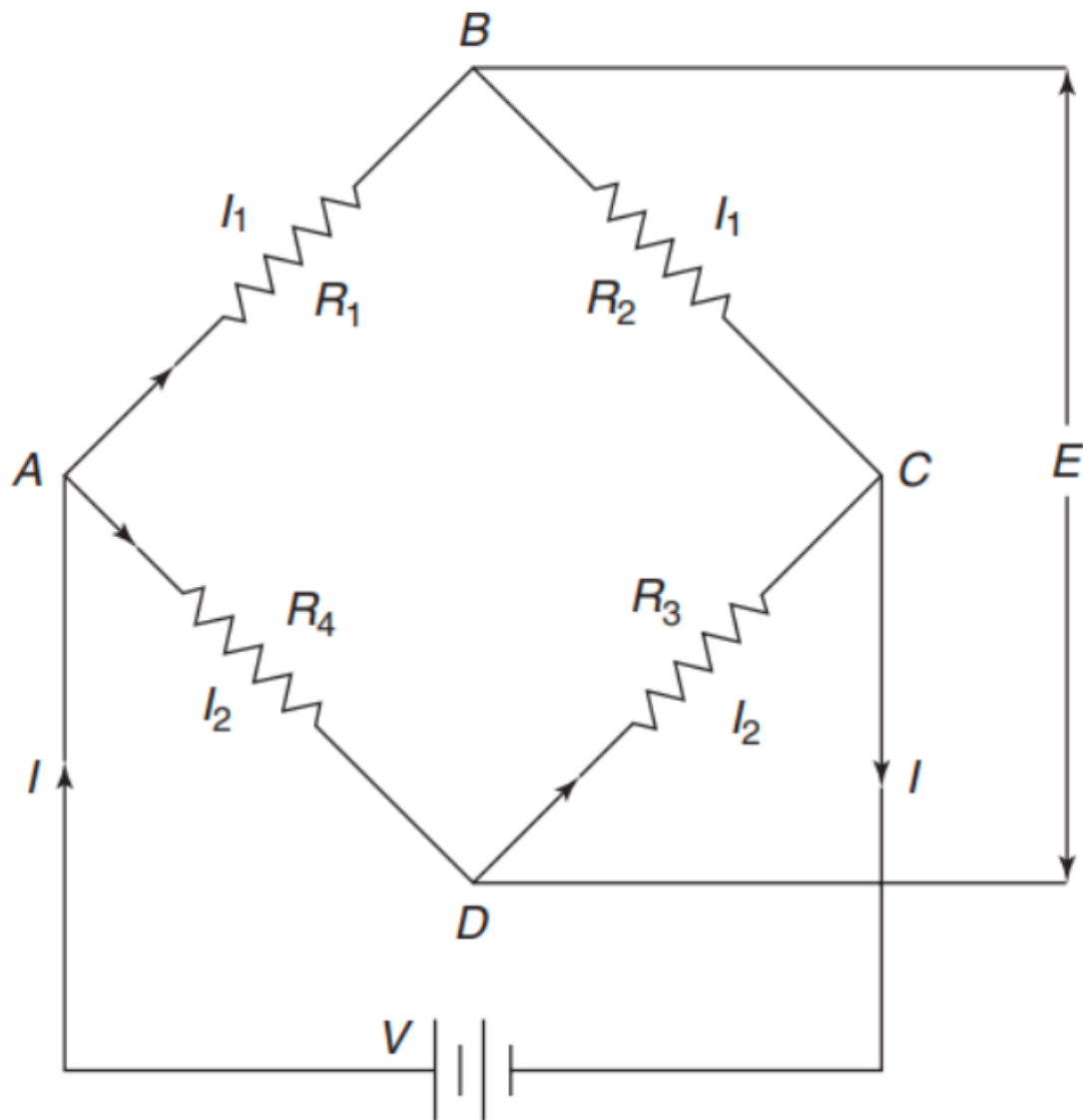
$$V_{out} = V_{in} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (12)$$

sendo

E : TBD

V : TBD

Figura 9 – Ponte de wheatstone



Fonte: TBD

 R_i : TBD

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 ().

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (13)$$

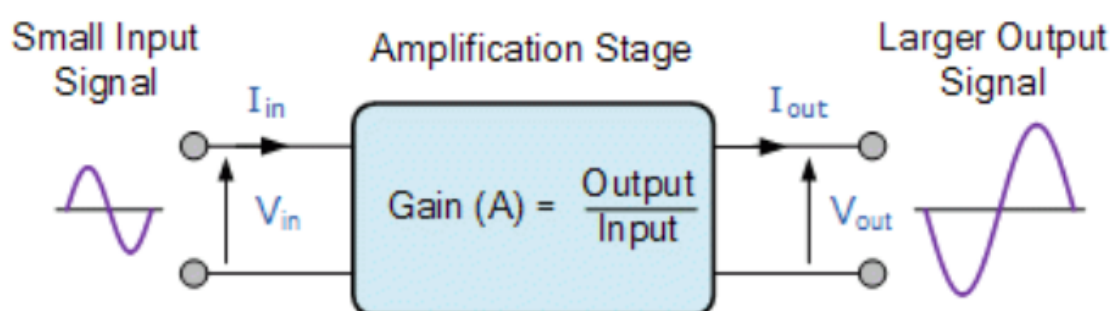
Circuitos de ponte se mostram de grande utilidade em experimentos práticos e são amplamente utilizados na medição da resistência de transdutores como extensômetros e outros tipos de sensores que convertem uma grandeza física em uma variação de resistência. Para medições estáticas, a tensão de saída do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

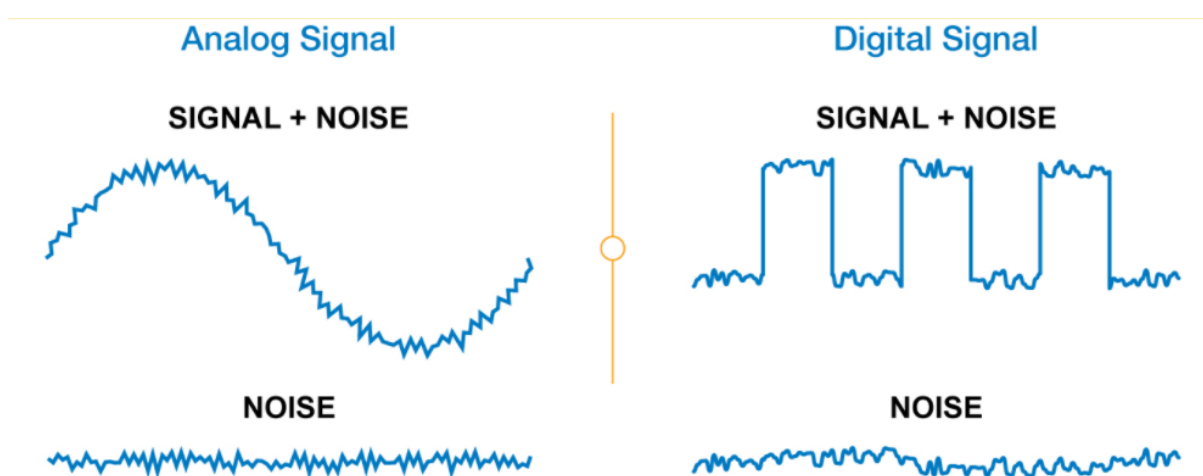
Medidas experimentais podem ocorrer de diversas formas e em vários casos os sinais são considerados fracos, logo eles devem ser amplificados com o objetivo de facilitar sua utilização por um dispositivo de saída. A maior parte dos amplificadores de sinal atuais utilizam circuitos integrados ou dispositivos de estado sólido para amplificar um sinal fraco analógico (HOLLMAN, 2011). O grau de amplificação de um amplificador pode ser dado pela equação(), que relaciona o sinal de entrada recebido pelo amp com o sinal de saída, que é lido pelo controlador.

Figura 10 – Princípio de funcionamento de um amplificador de sinal



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 11 – Ilustração de ruídos presentes em sinais analógicos e digitais



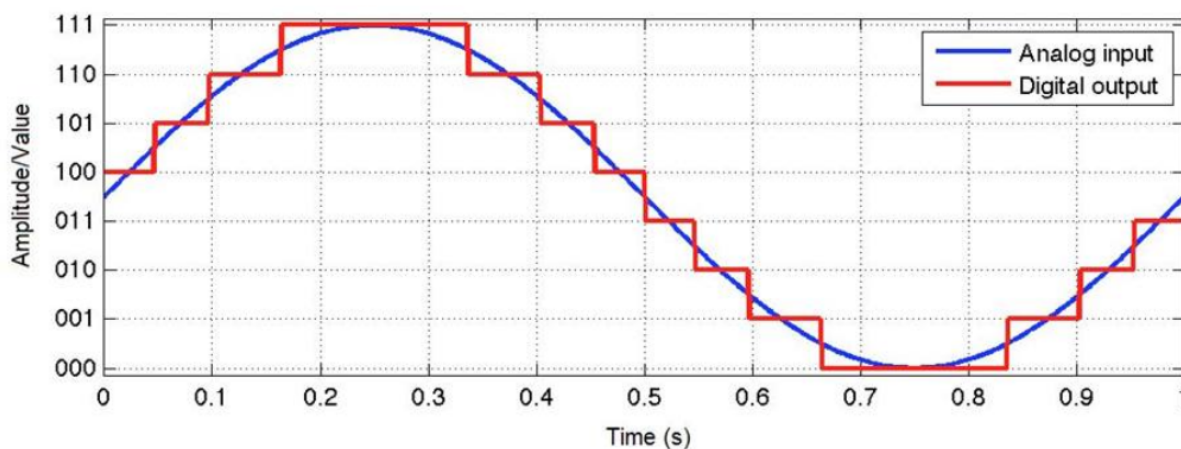
Fonte: www.quora.com/How-can-digital-signals-posses-noise-immunity acesso em fev 2022

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.

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 das 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 dentre 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).

Figura 12 – 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

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

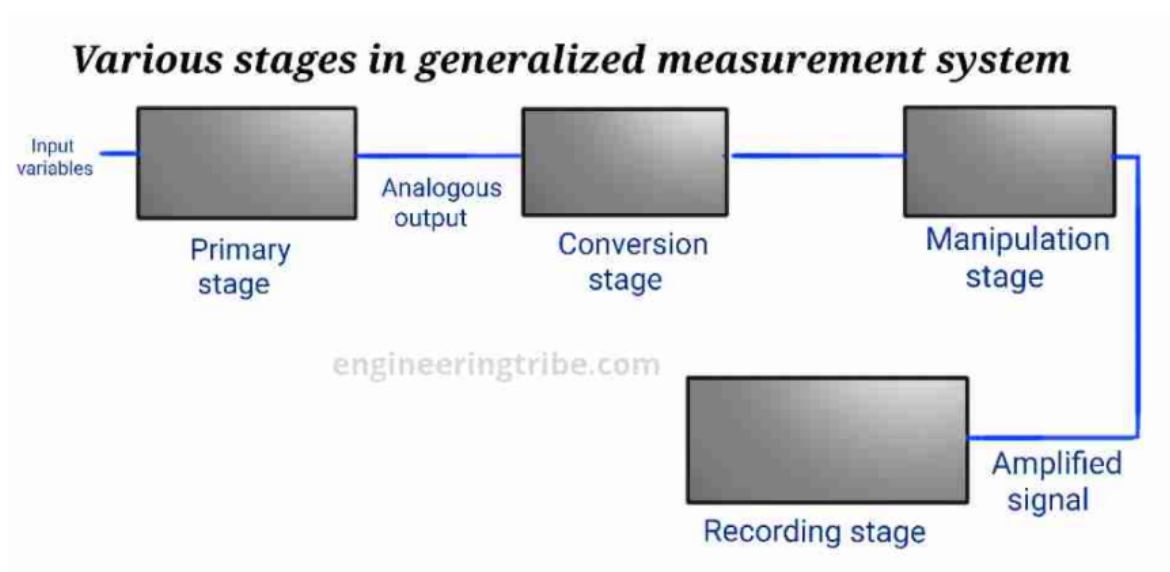
A maior parte dos sistemas de medição podem ser divididos em três partes, um estágio de detecção da medida física, um estágio intermediário de amplificação, filtragem e conversão de sinal e um estágio final, que engloba a obtenção e processamento do sinal por um dispositivo de controle (HOLLMAN, 2011).

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).

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

Figura 13 – Diagrama de blocos dos estágios de um sistema de medição



Fonte: TBD

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 ± 256 mV, o que permite pequenos sinais serem medidos 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 amostra 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

Figura 14 – Controlador ESP32



Fonte: amazon.com

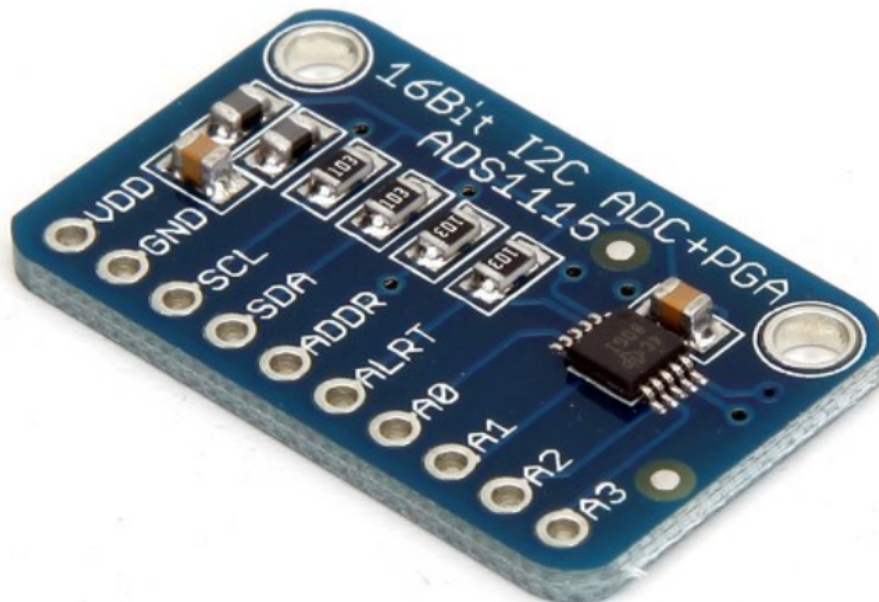
aleatória, que seguem uma distribuição estatística normal, e o experimentador pode estar desejando obter o valor médio de diversas leituras realizadas (HOLLMAN, 2011). A equação () obtém o valor médio para uma medição experimental consistente de diversas leituras.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^x a_i \quad (14)$$

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (15)$$

Figura 15 – Amplificador de sinal ADS1115



Fonte: amazon.com

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().

$$\chi^2 = \sum \frac{(\text{observed} - \text{expected})^2}{\text{expected}} \quad (16)$$

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). Com o objetivo de facilitar a obtenção dos dados estatísticos para cada amostra obtida, foi criada uma ferramenta computacional utilizando a linguagem python.

2.5.1 Ambiente de desenvolvimento computacional Python

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().

Tabela 1 – Funções 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.

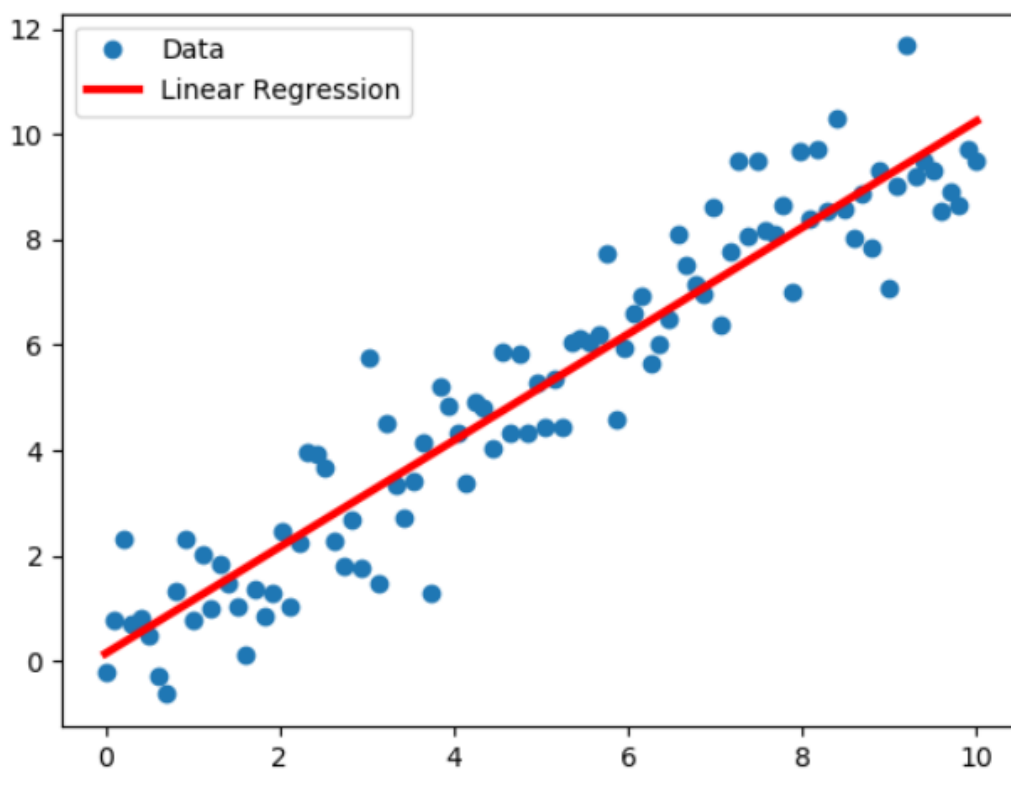
2.5.2 Análise dos valores nominais

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 16 – Regressão linear



Fonte: www.researchgate.net/figure/Linear-Regression-model-sample-illustration_fig3_340271573 acesso em 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. O desenvolvimento integrado de produto deve ser feito considerando todos os requisitos, restrições e soluções de forma simultânea durante as fases do projeto.

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.

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.

Com a finalidade de facilitar o desenvolvimento do projeto, foi utilizado a metodologia de produto PRODIP, desenvolvida na obra de em ([NEDIP-UFSC, 2021](#)), para organizar e linearizar as atividades de desenvolvimento do dispositivo.

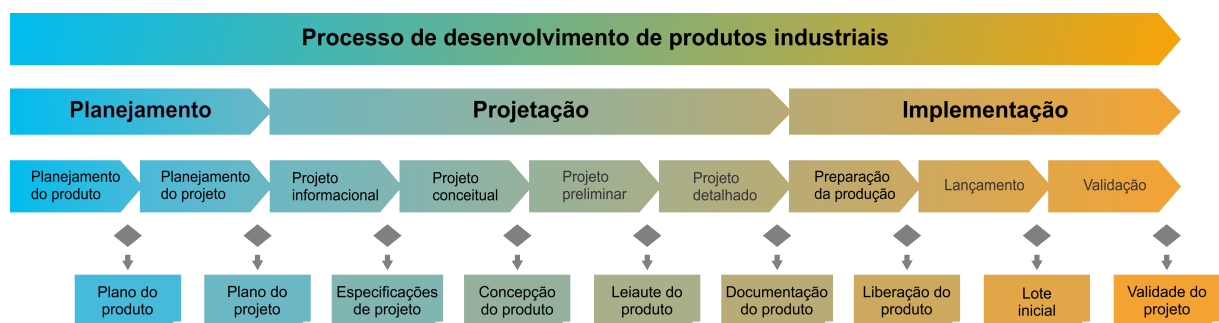
3 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta uma breve introdução e apresenta os resultados das etapas da metodologia de desenvolvimento do protótipo do dispositivo, e apresenta a metodologia do experimento utilizado para obter os resultados de performance do protótipo.

3.1 METODOLOGIA DE PROJETO DE PRODUTO

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 (NEDIP-UFSC, 2021).

Figura 17 – Etapas da metodologia PRODIP



Fonte: **PRODIP (2020)**

Essa metodologia foi utilizada para organizar e linearizar as atividades de desenvolvimento do dispositivo, certas etapas ilustradas foram ignoradas e outras adicionadas devido ao objetivo do projeto e o tipo do produto desenvolvido.

3.1.1 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).

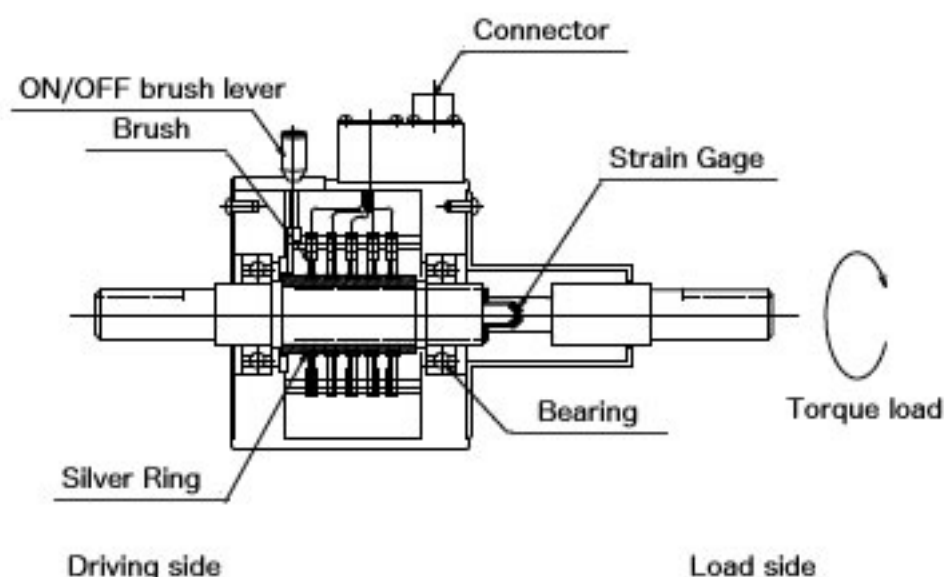
O problema proposto foi o de encontrar a solução para a medição de torque dinâmico em aplicações automotivas, e a principal motivação é o fato de que foi verificado

ser um tipo de grandeza não muito monitorada devido a dificuldade de obtenção dos valores e do custo, peso e complexidade dos dispositivos existentes para esses fins atualmente. Os principais tipos de produtos disponíveis identificados para esse tipo de aplicação são os transdutores de torque, utilizados em ramos industriais, e os dinamômetros de bancada, que são usualmente utilizados para identificar as curvas de torque e potência de motores.

3.1.1.1 pesquisa de mapeamento tecnológico

Os transdutores de torque são de maior interesse dado o princípio de funcionamento, segundo a fabricante Kyowa (www.kyowa-ei.com/eng/technical/sensors/torque.html acesso em julho de 2020) seus transdutores de torque convertem torção, calculadas pela tensão de cisalhamento superficial, em tensão elétrica, garantem medição fácil e acurada de torque sob condições de funcionamento desde paradas até altas rotações, e devido ao fato de serem utilizados extensômetros como sensor, medidas estáveis e precisas são garantidas até em longas durações de operação e condições severas. A [Figura 18](#) mostra os principais componentes desse tipo de dispositivo.

Figura 18 – Principais componentes de um transdutor de torque industrial



Fonte: **Showa Sokki (acesso em julho de 2020) **

O princípio de funcionamento dos transdutores industriais é baseado na leitura das tensões superficiais de um eixo utilizando extensômetros, foi definido que o princípio de funcionamento do dispositivo seguiria os mesmos princípios já utilizados.

3.1.1.2 revisão bibliográfica

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, Sciencedirect 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, 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.

(NURPRASETIO *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; MERELLES, 2017) (SILVA; VARANIS; MERELLES *et al.*, 2018) 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.

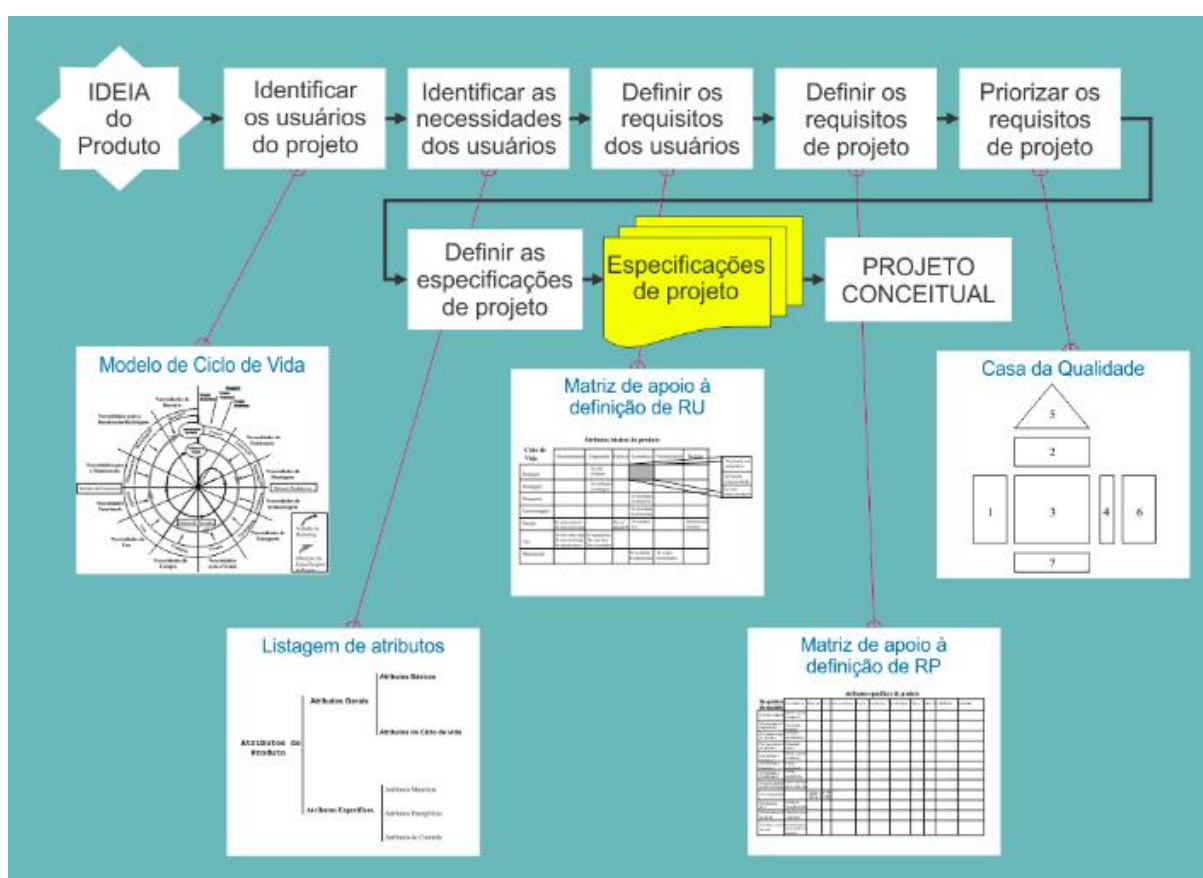
O presente trabalho também é fortemente baseado no experimento e nos resultados do trabalho de conclusão de curso desenvolvido por (MINELA, 2017), será utilizado o mesmo dispositivo para realizar os experimentos e a metodologia de análise dos sinais será semelhante a este trabalho mencionado.

Com os dados do mapeamento tecnológico e da revisão dos trabalhos científicos recentes, é elaborado um escopo base do projeto, seguido pela definição de um conceito básico de funcionamento, os componentes necessários e os respectivos preços, estes dados estão disponíveis no apêndice A. (**Falta anexar, arquivo 0 - Escopo do projeto no drive, planilha "mapa de tecnologias", incorporar uma parte da planilha de revisão bibliográfica junto**)

3.1.2 Projeto Informacional

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.

Figura 19 – Etapas do projeto informacional



Fonte: **PRODIP (2020)**

apresentar o resultado das pesquisas de mercado, listagem de atributos e da matriz QFD.

3.1.3 Projeto Conceitual

Busca de soluções conceituais para o problema, onde as alternativas são geradas e avaliadas técnica e economicamente, as ferramentas disponíveis são a síntese de funções, matriz morfológica e matriz multi critério de seleção

3.1.4 Projeto Preliminar

“Solução conceitual é desenvolvida em termos de layout, arranjo, formas, geometria, materiais e processos de fabricação”. A configuração da solução solucionada (embodiment design). modelos de análise, simulação e otimização da solução são empregados. Construção e testes de protótipos.

3.1.5 Projeto Detalhado

Os detalhes da solução otimizada são finalizados. Concluem-se os testes de protótipos e revisa-se a solução em detalhes, prepara-se a documentação final do produto e da produção

3.2 METODOLOGIA DO EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Resultados

4.1.1.1 Resultados

5 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

6 EXPERIMENTO

7 RESULTADOS

8 CONCLUSÕES

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Lipsum me [31-33]

REFERÊNCIAS

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. 35.

DEVELOPERS, SciPy. **Documentação SciPy**. English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://docs.scipy.org/doc/>>. Citado na p. 36.

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. 31.

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. 40.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo (SP): Pearson Education do Brasil, 2010. ISBN 9788576053736. Citado nas pp. 18–22, 24–26.

HOLLMAN, Jack Philip. **Experimental methods for engineers**. 8. ed. [S.l.]: McGraw - Hill, 2011. Citado nas pp. 26, 27, 29–34.

INSTRUMENTS, Texas. **ADS1115 Datasheet**. English. Jan. 2022. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/292735/TI/ADS1115.html>>. Citado na p. 32.

MINELA, Sthefani Neves. **EXTENSOMETRIA: ESTUDO E APLICAÇÃO**. 2017. Diss. (Mestrado) – UFSC, Joinville. Citado na p. 41.

NEDIP-UFSC. **Metodologia PRODIP**. Dez. 2021. Disponível em: <<https://nedip.ufsc.br/sessao/modelo-prodip-1>>. Citado nas pp. 37, 38.

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.l.]: 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. 19–21, 23, 25.

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.l.]: IEEE, out. 2018. DOI: 10.1109/icevt.2018.8628346. Citado na p. 40.

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.l.]: ABMEC Brazilian Association of Computational Methods in Engineering, 2017. DOI: 10.20906/cps/cilamce2017-0718. Citado na p. 40.

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. Citado na p. 40.

TIM HALL, J.-P. Stacey. **Python 3 for Absolute Beginners**. [S.l.]: 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. 35.

Apêndices

APÊNDICE A – COMO ESTA PÁGINA NÃO ESTÁ SENDO COMPLETAMENTE PREENCHIDA, ELE ESTÁ GERANDO A CAIXA INFERIOR INFERIOR DA PÁGINA

(encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, line-spread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output, 4. How to display the font size in use in the final output, 5. How to display the font size in use in the final output, 6. How to display the font size in use in the final output, 7. How to display the font size in use in the final output, 8. How to display the font size in use in the final output, 9. How to display the font size in use in the final output,

A.1 (ENCODING: T1, FAMILY: PHV, SERIES: M, SHAPE: N, SIZE: 12, BASELINE: 14.5PT, LINESPREAD: 1.241, LINESPACING: 17.99446PT)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output, 4. How to display the font size in use in the final output, 5. How to display the font size in use in the final output, 6. How to display the font size in use in the final output,

7. How to display the font size in use in the final output, 8. How to display the font size in use in the final output, 9. How to display the font size in use in the final output, 10. How to display the font size in use in the final output, 11. How to display the font size in use in the final output, 12. How to display the font size in use in the final output,

A.1.1 (encoding: T1, family: phv, series: b, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output, 4. How to display the font size in use in the final output, 5. How to display the font size in use in the final output, 6. How to display the font size in use in the final output,

7. How to display the font size in use in the final output, 8. How to display the font size in use in the final output, 9. How to display the font size in use in the final output, 10. How to display the font size in use in the final output, 11. How to display the font size in use in the final output, 12. How to display the font size in use in the final output,

A.1.1.1 (encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output, 4. How to display the font size in use in the final output, 5. How to display the font size in use in the final output, 6. How to display the font size in use in the final output,

7. How to display the font size in use in the final output, 8. How to display the font size in use in the final output, 9. How to display the font size in use in the final output, 10. How to display the font size in use in the final output, 11. How to display the font size in use in the final output, 12. How to display the font size in use in the final output,

A.1.1.1.1 (encoding: T1, family: phv, series: m, shape: it, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output, 4. How to display the font size in use in the final output, 5. How to display the font size in

use in the final output, 6. How to display the font size in use in the final output, 7. How to display the font size in use in the final output,

8. How to display the font size in use in the final output, 9. How to display the font size in use in the final output, 10. How to display the font size in use in the final output, 11. How to display the font size in use in the final output, 12. How to display the font size in use in the final output,

Lipsum me [31-35]

Anexos

ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO

A.1 ENGLISH GUIDELINES FOR PUBLICATION - TITLE HERE (14 PT TYPE SIZE, UPPERCASE, BOLD, CENTERED)

Abstract: The objective of this document is to instruct the authors about the preparation of the manuscript for its submission to the Revista Eletrônica de Potência (Brazilian Power Electronics Journal). The authors should use these guidelines for preparing both the initial and final versions of their paper. Additional information about procedures and guidelines for publication can be obtained directly with the editor, or through the web site <http://www.sobraep.org.br/revista>. This text was written according to these guidelines

interwordspace: 3.33588pt

interwordstretch: 1.99188pt

emergencystretch: 58.74916pt

english guidelines for publication - TITLE HERE (14 PT TYPE SIZE, UPPERCASE, BOLD, CENTERED)

Adriano Ruseler

Federal University of Santa Catarina – UFSC, Postgraduate Program in Electrical Engineering – PGEEL
Power Electronics Institute – INEP, Florianópolis, SC, Brazil
e-mail: ruseler@inep.ufsc.br

Abstract – The objective of this document is to instruct the authors about the preparation of the manuscript for its submission to the Revista Eletrônica de Potência (Brazilian Power Electronics Journal). The authors should use these guidelines for preparing both the initial and final versions of their paper. Additional information about procedures and guidelines for publication can be obtained directly with the editor, or through the web site <http://www.sobraep.org.br/revista>. This text was written according to these guidelines.

Keywords – Authors shall provide a maximum of six keywords (in alphabetical order, capitalized, separated by commas) to help identify the major topics of the paper.

NOMENCLATURE

P	Number of poles.
V_{qd}	Stator voltage dq components.
I_{qd}	Stator current dq components.

I. INTRODUCTION

The Brazilian Power Electronics Journal (Revista Eletrônica de Potência) is an appropriate media through which the SOBRAEP (Brazilian Power Electronics Society) members and experts in the field of Power Electronics may present and discuss their scientific and academic activities. Therefore, the Editorial Staff invites you to submit a full format paper in the field of Power Electronics, including advances in the state of the art, through theoretical and experimental results, as well as tutorial information on subjects of interest to the Society. In case the paper, or part of it, has been presented or published in any national or international journal or conference, it must be declared by the authors in the body of the paper (when and where).

Papers in Portuguese, Spanish and English will be accepted. The texts submitted in Portuguese or Spanish must include the title, the abstract and the keywords in English as well.

Authors must submit their manuscript electronically and follow the revision process through the iSOBRAEP portal at <http://www.sobraep.org.br/revista>. From this entry page, access can be obtained to all information required for the submission of a manuscript.

It should be noted that Manuscripts Must Be Submitted as an Editable PDF document. Therefore, after editing your manuscript in agreement with these guidelines, a high-quality PDF file must be generated so it can be submitted through the iSOBRAEP portal. Upon Final Acceptance of the manuscript, the strong requirement for publication is a final electronic version of the paper prepared in agreement with these guidelines. In addition, papers will only be published if the Copyright form available at the iSOBRAEP portal is completed.

The main objective of the Introduction section is presenting the nature of the problem that is discussed in the paper, through an adequate literature review, and the contribution of the submitted manuscript.

If relevant, a Nomenclature section may be included immediately before the Introduction, with a list of variables used in the text. This item should not contain reference numeration, as well as items Acknowledgements, References and Biographies.

A. Presentation of the Text

Papers submitted for publication to the Brazilian Power Electronics Journal should have, preferably, **eight pages** or less. Papers with a higher number of pages must pay an overlength page charge (R\$ 150 per extra page) before its publication, until the limit of four extra pages. Consequently, the maximum page limit is **12 pages**.

Authors must use International System units (SI or MKS).

Authors of the paper must prepare it and then send it as a PDF file, through the iSOBRAEP portal, in accordance with these guidelines. The manuscripts that do not follow these guidelines will be rejected, and the authors will be informed.

B. Text Editing

The manuscript must be prepared on A4 page format (297 mm x 210 mm), as demonstrated in these guidelines.

The recommended word processor is Word for Windows.

1) *Type sizes*: The type sizes specified in these guidelines are according to the word processor Word for Windows and the typeface must be Times New Roman. Table I shows the standard sizes of the characters that should be used in the different sections of the manuscript.

2) *Page Format*: Set top and bottom margins to 25 mm, left margin to 18 mm and right margin to 12 mm. The column is 87 mm. The space between the two columns is 6 mm. Paragraph indentation is 4mm.

This footnote will be used only by the Editor and Associate Editors. The edition in this area is not permitted to the authors. This footnote must not be removed while editing the manuscript. Manuscript compiled at 19:04h, June 6, 2016.

TABLE I
Type Sizes

Style			
Size (Points)	Normal	Bold	Italic
8	Table texts		
9	Figure captions		
10	Authors' affiliations; main text; references	Abstract text; keywords, table captions	Abstract title and keywords title
12	Authors' names		
14	Paper title		

II. ORGANIZATION OF THE PAPER

This section presents the main issues for editing the manuscript.

A. General Organization

The papers that shall be published in the Brazilian Power Electronics Journal must contain the following main sections: 1) Title; 2) Authors and Affiliations; 3) Abstract and Keywords; 4) Introduction; 5) Body Text; 6) Conclusions; 7) References; 8) Biographies. This order must be respected, unless the authors add some items, such as: Nomenclature; Appendices and Acknowledgements.

Some comments regarding the main items of the manuscripts are presented below.

1) *Title*: The title of the paper should be as succinct as possible, stating the subject of the paper in a very clear manner. It should be centered at the top of the first page, in bold, type size 14 points, with the whole title in capital letters.

2) *Authors and affiliations*: Below the title (leaving one blank line), also centered, the name(s) of the author(s) must be included. The middle names may be abbreviated, but the first and last names must be written in their complete forms (type size 12 points). Immediately below the authors' names, their affiliations, with city, state and country, must be informed (type size 10 points). The electronic addresses must be informed just below the affiliations (type size 10 points).

3) *Abstract and keywords*: This part is considered one of the most important in the whole paper. It is based on information in Abstract and Keywords that technical papers are indexed and stored in databases.

The Abstract should have no more than 200 words, indicating the main ideas contained in the paper, as well as procedures and obtained results. The Abstract should not be confused with the Introduction and should not have any abbreviations, references, figures, etc. For writing the Abstract, as well as the whole manuscript, you should use passive voice, e. g., "... the experimental results show that..." instead of "... the results we obtained show that...". The word Abstract must be written both in italic and in bold. The Abstract text should be in bold.

Keywords are index terms that identify the main topics of the paper. The term Keywords must be both in italic and bold. The Keywords themselves should be in bold.

4) *Introduction*: The Introduction must prepare the reader for the paper he/she will read, including a historical overview of the subject and also presenting the main contributions of the paper. The Introduction must not be similar to the Abstract and it is the first section of the paper to be numbered as a section.

5) *Body text*: The authors must organize the body text in various sections, which should contain important information about the proposal of the paper, facilitating its comprehension for readers.

6) *Conclusions*: The conclusions should be as clear as possible, highlighting the importance of the paper in the respective research area. The advantages and disadvantages of the proposed subject should be clearly emphasized, as well as the obtained results and possible applications.

7) *References*: The citation of references throughout the text should appear between square brackets, just before the punctuation mark at the end of the sentence in which the reference is inserted. Only the number of the references should be used, avoiding citations such as "... according to the reference [2]...".

Papers that were accepted for publication, but were not published yet, should also be in the references along with the citation "in Press".

Papers from journals and conferences must begin with the name of the authors (initials followed by the last name), followed by the title, journal or conference name (in italic), number of volume, pages, month and year of publication.

Regarding books, following the name of the authors (initials followed by last name), the title should be in italic, and then should come the publisher, number of edition and place and year of publication.

At the end of these guidelines, there is an example of how the references should be inserted [1]–[8].

8) *Biographies*: The biographies of the authors should appear in the same order as in the beginning of the paper and should basically contain the following items:

- Full name (in bold and underlined);
- Place and year of undergraduation and graduation conclusions;
- Professional experience (Institutions and companies in which they have worked, number of patents obtained, areas of expertise, relevant scientific activities, scientific societies in which they are members, etc.).

In case additional items are used, such as Nomenclature, Appendices and Acknowledgements, the following instructions should be considered:

9) *Nomenclature*: The nomenclature consists of the definition of quantities and symbols used throughout the paper. Its inclusion is not mandatory and this item must not be numbered. If this item is included, it should precede the

Introduction. In case the authors do not include this item, the definition of quantities and symbols must occur during the text, right after they appear. In the beginning of these guidelines there is an example of this optional item.

10) Acknowledgements and appendices: The acknowledgements to any collaborators, as well as appendices, do not receive any numeration and should be at the end of the text, before the references. At the end of this text there is an example of this optional item.

On the last page of the paper, the authors should distribute the contents evenly, using both columns, in a way that both end in a parallel manner.

B. Organization of the Sections of the Paper

The organization of the manuscript in titles and subtitles is important to divide it in sections, which help the reader to find subjects of interest in the paper. They also help the authors to develop their paper in an orderly form. The paper can be organized in primary, secondary and tertiary sections.

The primary sections are the titles of the actual sections. They are written in capital letters in the center of the column separated by a blank line above and another one below them, and sequential Roman numerals should be used.

The secondary sections are the subtitles of the sections. Just the first letter of each word of the section should be written with a capital letter. It should be located at the left part of the column being separated by a blank line above from the rest of the text. The designation of the secondary sections is done with letters in uppercase form, followed by a dot. They should be in italic.

The tertiary sections are subdivisions of the secondary sections. Only the first letter of the first word of the section should be a capital letter. The designation of the tertiary sections should be done with Arabic numerals, followed by parentheses. They should be in italic.

III. OTHER INSTRUCTIONS

A. Editorial Rules

For papers with multiple authors, it is necessary to inform the order of presentation of the authors and filling out the Copyright form at the iSOBRAEP portal, authorizing the publication of the paper.

The Brazilian Power Electronics Journal should be considered source of original publication. It reserves its right to make normative, spelling and grammatical modifications in the original files, but respecting the style of the authors. The final versions cannot be sent to the authors.

The published papers will become property of the Brazilian Power Electronics Journal, and its total or partial reprinting must be authorized by SOBRAEP.

Figures, tables and equations should follow the following guidelines.

B. Figures and Tables

Tables and figures (drawings or pictures) should be inserted in the text right after they are mentioned for the first time, as long as they fit the size of the columns; if necessary, use the whole page. Figures resolution should be at least 300 dpi and

vector files should be preferably used for better print quality. Table captions should be above the tables and figure captions should be below the figures. The tables should have titles and they are designated by the word Table, being numbered in sequence by Roman numerals. Table captions must be centered and in bold.

Figures also need captions and they are designated by Figure in the text (Fig. in the caption itself), numbered with Arabic numerals in a sequenced manner, left- and right-justified, as shown in the example. The designation of the parts of a figure is done by adding lowercase letters to the numbers of the figures starting with the letter a, e.g. Figure 1(a).

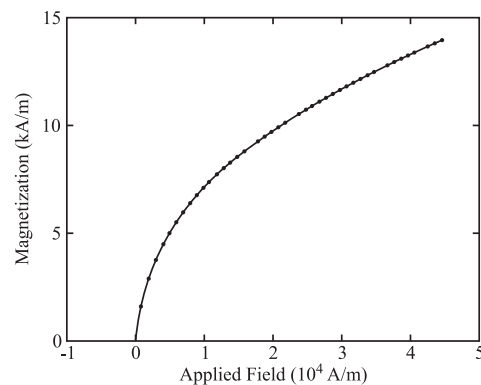


Fig. 1. Magnetization as a function of applied field. (Note that “Fig.” is abbreviated and there is a period after the figure number followed by two spaces.)

To better understand graphs, the definition of their axes should be done with words not letters, except when referring to waveforms and phase planes. The units should be between parentheses. For example, use the denomination “Magnetization (A/m)”, instead of “M (A/m)”.

Figures and tables should be positioned preferably in the beginning or the end of the column, avoiding putting them in the middle. Avoid tables and figures whose sizes exceed the size of the columns. The figures should preferentially be in black, with a white background, since the printed version of the journal is in black and white. Their lines should be thick, so the impression is readable.

C. Abbreviations and Acronyms

Abbreviations and acronyms must be defined the first time they are used in the text, e.g. “... Pulse-Width Modulation (PWM)...”.

D. Equations

Number equations consecutively with equation numbers in parentheses flush with the right margin, as in (1). The equations should be written in a compact form, centered in the column. If a nomenclature section is not included in the beginning of the text, the quantities should be defined right after the equation, such as:

$$\Delta I_L = I_o + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_i}{Z} \quad (1)$$

where:

- ΔI_L - resonant inductor peak current;
- I_o - load current;
- V_i - source voltage;
- Z - characteristic impedance.

IV. CONCLUSIONS

This paper was fully written in accordance with the guidelines for submissions of papers in English.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank John Doe for the collaboration of preparing this paper. This Project was financed by the CNPq (xxyyzz process).

REFERENCES

- [1] C. T. Rim, D. Y. Hu, G. H. Cho, "Transformers as Equivalent Circuits for Switches: General Proof and D-Q Transformation-Based Analysis", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, no. 4, pp. 832–840, July/August 1990.
- [2] E. A. Vendruscolo, J. A. Pomilio, "Motores de Indução Acionados por Inversores PWM-VSI: Estratégias para Atenuação de Sobreensões", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 8, no. 1, pp. 49–56, Junho 2003.
- [3] S. A. González, M. I. Valla, C. H. Muravchik, "A Phase Modulated DGPS Transmitter Implemented with a CMRC", in *Proceedings of COBEP*, vol. 2, pp. 553–558, 2001.
- [4] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics: converters, applications, and design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1995.
- [5] T. A. Lipo, M. D. Manjrekar, "Hybrid Topology for Multilevel Power Conversion", US Patent 6 005 788, 21 Dec. 1999.
- [6] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Std. 519-1992, 1993.
- [7] SW Technologies, "SWDV Converter", [Online], 2001, URL: www.sw.com.br.
- [8] I. Barbi, *Etude de Onduleurs Autoadaptifs Destines a la Alimentation de Machines Assynchrones*, Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, França, 1979.

ANEXO B – COMO EXIBIR O TAMANHO DA FONTE EM USO NA SAÍDA FINAL

(encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output,

B.1 (ENCODING: T1, FAMILY: PHV, SERIES: M, SHAPE: N, SIZE: 12, BASELINE: 14.5PT, LINESPREAD: 1.241, LINESPACING: 17.99446PT)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output, 4. How to display the font size in use in the final output, 5. How to display the font size in use in the final output, 6. How to display the font size in use in the final output,

7. How to display the font size in use in the final output, 8. How to display the font size in use in the final output, 9. How to display the font size in use in the final output, 10. How to display the font size in use in the final output, 11. How to display the font size in use in the final output, 12. How to display the font size in use in the final output,

B.1.1 (encoding: T1, family: phv, series: b, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output, 4. How to display the font size in use in the final output, 5. How to display the font size in use in the final output, 6. How to display the font size in use in the final output,

7. How to display the font size in use in the final output, 8. How to display the font size in use in the final output, 9. How to display the font size in use in the final output, 10. How to display the font size in use in the final output, 11. How to display the font size in use in the final output, 12. How to display the font size in use in the final output,

B.1.1.1 (encoding: T1, family: phv, series: m, shape: n, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output, 4. How to display the font size in use in the final output, 5. How to display the font size in use in the final output, 6. How to display the font size in use in the final output,

7. How to display the font size in use in the final output, 8. How to display the font size in use in the final output, 9. How to display the font size in use in the final output, 10. How to display the font size in use in the final output, 11. How to display the font

size in use in the final output, 12. How to display the font size in use in the final output,

B.1.1.1.1 (encoding: T1, family: phv, series: m, shape: it, size: 12, baseline: 14.5pt, linespread: 1.241, linespacing: 17.99446pt)

1. How to display the font size in use in the final output, 2. How to display the font size in use in the final output, 3. How to display the font size in use in the final output, 4. How to display the font size in use in the final output, 5. How to display the font size in use in the final output, 6. How to display the font size in use in the final output, 7. How to display the font size in use in the final output,

8. How to display the font size in use in the final output, 9. How to display the font size in use in the final output, 10. How to display the font size in use in the final output, 11. How to display the font size in use in the final output, 12. How to display the font size in use in the final output,

Lipsum me [55-65]