



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATUAIS
CURSO INTERDISCIPLINAR DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PÉRYCKLES FRANCKLYN MEDEIROS PAULA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO PARA
APLICAÇÃO EM UM VEÍCULO TIPO BAJA.**

MOSSORÓ/RN

2020

PÉRYCKLES FRANCKLYN MEDEIROS PAULA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO PARA
APLICAÇÃO EM VEÍCULO UM TIPO BAJA.**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Centro de Ciências Exatas e Naturais - CCEN como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Profº Dr. Rômulo Pierre Batista dos Reis

MOSSORÓ/RN

2020

PÉRYCKLES FRANCKLYN MEDEIROS PAULA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO
PARA APLICAÇÃO EM UM VEÍCULO TIPO BAJA.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Centro de Ciências Exatas e Naturais -
CCEN como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Ciência e
Tecnologia.

Defendida em: 05 / 02 / 2 020.

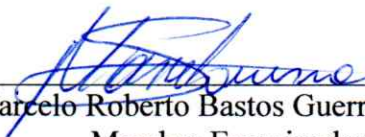
BANCA EXAMINADORA



Profº. Dr. Rômulo Pierre Batista dos Reis. (UFERSA)
Presidente



Profº. Dr. Zoroastro Torres Vilar. (UFERSA)
Membro Examinador



Profº. Dr. Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale. (UFERSA)
Membro Examinador

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M488p Medeiros, Peryckles .
Projeto e Construção de um Transdutor de
Deslocamento para Aplicação em um Veículo tipo Baja
/ Peryckles Medeiros. - 2020.
42 f. : il.

Orientador: Rômulo Pierre.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2020.

1. Baja SAE. 2. Construção. 3. Instrumentação.
4. Projeto. 5. Transformador Diferencial Linear
Variável (LVDT). I. Pierre, Rômulo, orient. II.
Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder saúde para lutar além de estar sempre me apoiando em todas as dificuldades da minha vida.

Aos meus pais, Francisca das Chagas de Medeiros Paula e Protásio Pereira de Paula Junior, por compreenderem a minha ausência nessa caminhada e toda ajuda concebida em todo esse tempo.

A toda minha família, pelo apoio e torcida.

Ao Profº Rômulo Pierre Batista dos Reis, orientador deste projeto, por sempre estar à disposição a orientar e ajudar durante todo esse tempo. Obrigado professor!

A Equipe Cactus Baja e a todos que fazem parte desta família, vocês foram e sempre serão muito importantes na minha vida.

E a todas outras pessoas e amigos que contribuíram de alguma forma na minha vida.

“Não há segredo para o sucesso. É o resultado de preparação, trabalho duro e de aprender com o fracasso.”

Colin Powell

RESUMO

Visto a necessidade de obter medidas de posição relativa em diversas aplicações na indústria, buscou-se o desenvolvimento de um sensor de deslocamento linear, tendo como objetivo a construção de um Transformador Diferencial Linear Variável (LVDT), aplicado a um veículo tipo Baja SAE. Para isso precisou-se dimensionar e selecionar componentes de acordo com sua aplicação e construção. Para sua validação foi necessário calibrá-lo e testá-lo em seu funcionamento com o veículo Baja transpondo obstáculos. Através de sua característica intrínseca de mensurar distâncias lineares com grande exatidão pode-se medir pequenos deslocamentos com alta precisão. Estipulou-se uma faixa linear de trabalho de 100 mm no projeto conceitual, obtendo após a caracterização uma faixa de deslocamento de aproximadamente 60 mm. Os objetivos foram alcançados, visto que para a aplicação em um veículo baja, o amortecedor se desloca cerca de 40 mm em condições extremas.

Palavras-chave: Baja SAE, Construção, Instrumentação, Projeto, Transformador Diferencial Linear Variável (LVDT).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhamento da estrutura interna do LVDT.	14
Figura 2 - Esboço de um LVDT aberto.	16
Figura 3 - Pilares da Metrologia.	18
Figura 4 - Módulos funcionais de um sistema de medição.	18
Figura 5 - Curva característica de resposta ideal.	19
Figura 6 - Curva característica de resposta ideal obtida através de regressão linear.	20
Figura 7 - Correlação linear.	21
Figura 8 - Diagrama de dispersão e linha de regressão linear.	22
Figura 9 – Interface IDE do Arduino.	24
Figura 10 - Dimensões do carretel do LVDT.	25
Figura 11 - Início da usinagem do carretel.	26
Figura 12 - Resultado da usinagem.	26
Figura 13 - Processo de soldagem das chapas de ferrosilício.	27
Figura 14 - Núcleo feito de chapas de ferrosilício.	27
Figura 15 - Haste do LVDT.	28
Figura 16 - Detalhe da fixação da haste.	28
Figura 17 - Resultado do enrolamento da bobina do primário.	29
Figura 18 - Resultado do enrolamento das bobinas do secundário.	30
Figura 19 - Fluxograma da montagem em bancada.	30
Figura 20 - Montagem experimental da varredura de frequência.	31
Figura 21 - Curva característica de um LVDT.	31
Figura 22 - Circuito oscilador de 1 kHz.	32
Figura 23 - Circuito oscilador de 30 kHz.	32
Figura 24 - Retificador de onda completa com filtro.	33
Figura 25 - Resultado final do retificador de onda completa com filtro.	33
Figura 26 - Módulo ADS1015.	34
Figura 27 - Fluxograma da montagem em bancada.	34
Figura 28 - Montagem da calibração.	35
Figura 29 - Fluxograma da montagem dinâmica.	35
Figura 30 - Vista frontal da montagem do LVDT no amortecedor traseiro.	36
Figura 31 - Vista lateral da montagem do LVDT no amortecedor traseiro.	37
Figura 32 - Curva resposta frequência.	38
Figura 33 - Curva característica do deslocamento do núcleo.	39
Figura 34 - Faixa de deslocamento linear do LVDT.	40
Figura 35 - Linha de regressão na faixa de deslocamento linear do LVDT.	40
Figura 36 - Baja transpondo uma manilha.	41
Figura 37 - Dados da aquisição do Baja transpondo uma manilha.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do fio de cobre esmaltado.....	29
Tabela 2 - Dados da regressão linear entre 90 e 150 mm.....	40

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

LVDT	Transformador Diferencial Linear Variável
V_s	Tensão elétrica de saída
V_p	Tensão elétrica de entrada
kHz	Quilohertz
AC	Corrente alternada
SI	Sistema Internacional de Unidades
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
AWG	Escala Americana de bitola de fios
mm	Milímetro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	13
3. TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO VARIÁVEL LINEAR.....	13
3.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E FUNCIONAIS DO LVDT	13
3.2 METROLOGIA E ESTATÍSTICA APLICADAS Á CARACTERIZAÇÃO DO LVDT ..	17
3.3 HARDWARE E SOFTWARE UTILIZADO NA CONSTRUÇÃO DO LVDT	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 CONFECÇÃO DO CARRETEL DO LVDT	25
4.2 CONFECÇÃO DO NÚCLEO FERROMAGNÉTICO DO LVDT	27
4.3 CONFECÇÃO DA HASTE DO LVDT	28
4.4 ENROLAMENTO DAS BOBINAS	29
4.5 MONTAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA	30
4.6 CONFECÇÃO DA ELETRÔNICA DO LVDT	32
4.6.1 Circuito oscilador	32
4.6.2 Retificador de onda completa.....	33
4.6.3 Circuito amplificador	34
4.7 COMPORTAMENTO DA TENSÃO DE SAÍDA EM FUNÇÃO DO DESCOLAMENTO	34
4.8 MONTAGEM DO EXPERIMENTO DINÂMICO	35
5 RESULTADOS E DISCURSÕES	38
5.1 CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA.....	38
5.1.1 Amplitude de tensão induzida em função da frequência de excitação	38
5.1.2 Amplitude de tensão induzida em função do deslocamento	39
5.2 APLICAÇÃO DINÂMICA.....	41
6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS.....	44
APÊNDICE A – FOTO DO PRODUTO FINAL – LVDT	46
APÊNDICE B – FOTO DA TELA DO OSCILOCOPIO COM A FREQUÊNCIA DE	
EXCITAÇÃO DO CIRCUITO OSCILADOR.....	47

1. INTRODUÇÃO

O princípio de funcionamento de um Transdutor de Descolamento Linear Variável, ou seja, LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), é baseado na lei de indução de Faraday, por meio da variação do fluxo magnético em relação ao tempo (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019).

A descoberta de Faraday possibilitou o desenvolvimento de diversos dispositivos, entre eles o transformador. Que é uma máquina capaz de alterar os valores da tensão e de corrente elétrica alternada, de acordo com sua aplicação (GOZZI; PAREDE; HORTA, 2011). Um transformador é um equipamento que converte, por meio da ação de um campo magnético, a tensão elétrica de excitação (primário) de uma dada frequência, em um outro nível de tensão elétrica (secundário), porém na mesma frequência (CHAPMAN, 2013). Na forma mais simplificada, o transformador consiste em duas bobinas, isoladas eletricamente e acopladas através de um núcleo constituído de ferromagnético ou um núcleo de ar (TORO, 1999).

Para medições de deslocamento de alta precisão e em alta frequência, utiliza-se um LVDT por ser um dos métodos mais confiáveis e práticos para determinar distâncias lineares. Há uma diversa gama de situações para a aplicação deste instrumento.

Como o modelo projetado possibilitará um excelente alcance de deslocamento com uma grande precisão, pode-se mensurar dados desde pequenas dilatações térmicas (baixa amplitude) até extensos cursos de deslocamento (alta amplitude).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Construir e caracterizar um Transdutor de Deslocamento Linear Variável (LVDT) com uma faixa de deslocamento que atenda às necessidades de leitura do deslocamento relativo do amortecedor do Baja que é de no máximo 40 mm. Com isso, através de sua característica intrínseca irá mensurar deslocamentos com grandes amplitudes, podendo-se aplicado estática ou dinamicamente.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Análise do comportamento vibracional de uma suspensão em um veículo tipo baja. Com estes dados obtidos, validar a frequência natural teórica do protótipo.

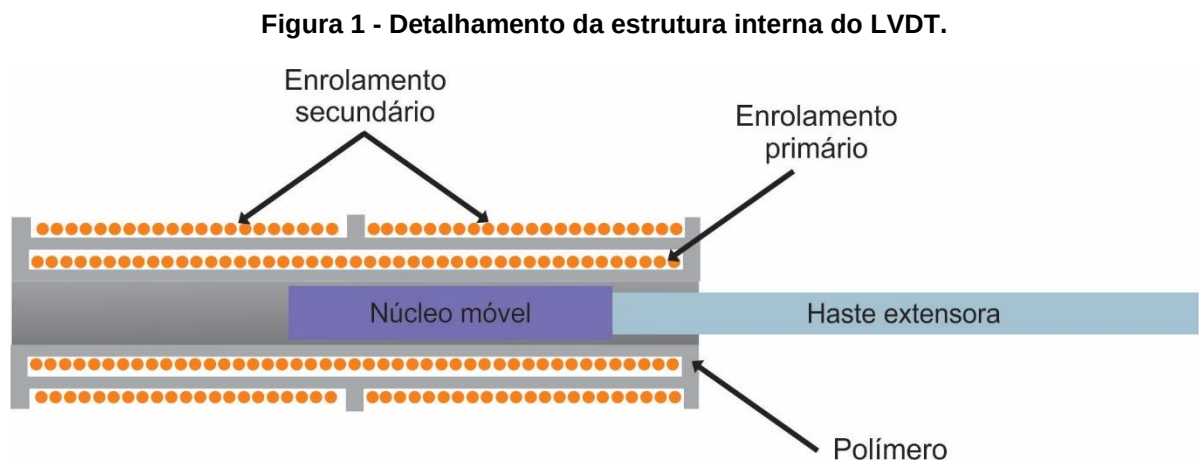
3. TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO VARIÁVEL LINEAR

3.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E FUNCIONAIS DO LVDT

O LVDT é considerado um dos instrumentos mais precisos e confiáveis para a determinação de deslocamentos lineares, na qual seu sinal de resposta é proporcional à posição de um núcleo magnético móvel que se move no seu interior (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019).

O princípio de funcionamento é similar a um transformador na qual ambos se relacionam com a primeira lei da indução de Faraday. Na qual afirma que, se houver um fluxo passando através de uma espira de um fio condutor, então uma força eletromotriz é induzida com intensidade proporcional a taxa com que fluxo magnético varia em relação do tempo (CHAPMAN, 2013). Assim com o movimento do núcleo móvel a tensão induzida do primário para o secundário é alterada, utilizando-se assim a lei de Lenz para determinar o deslocamento da haste através do sentido da corrente nas bobinas (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019).

A Figura 1 mostra a estrutura interna do LVDT, possuindo uma bobina primária no centro da sua estrutura e duas bobinas secundárias enroladas sobre a bobina do primário, ambas espaçadas simetricamente em uma estrutura feita de material polimérico. Como o número de espiras dos enrolamentos são uniformemente distribuídos ao longo do carretel, a tensão de saída é proporcional ao deslocamento do núcleo quando o mesmo está em movimento (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019).



Fonte: Autoria Própria

Para a confecção do carretel utiliza-se material polímero, pois além de serem materiais isolantes apresentam boa resistência e rigidez. Exemplos de alguns polímeros comuns são polietileno (PET), cloreto de polivinila (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e poliexametileno (náilon) (CALLISTER JUNIOR, 2002).

Os polímeros surgiram como uma grande alternativa de substituição da principal matéria prima da indústria (metais) por uma de menor custo, mantendo a eficiência como também sua qualidade e resistência, propriedades obtidas graças a grande evolução tecnológica.

Os náilons pertencem a uma classe de polímeros mais utilizados para diversas funcionalidades na engenharia, devido a associação de características como boa resistência ao impacto e excelente resistência química. Exemplos de algumas aplicações na indústria são a fabricação de: engrenagens, mancais, buchas, roscas,

polias, entre outros componentes que não exigem grandes esforços mecânicos (VANAT; JÚNIOR, 2014).

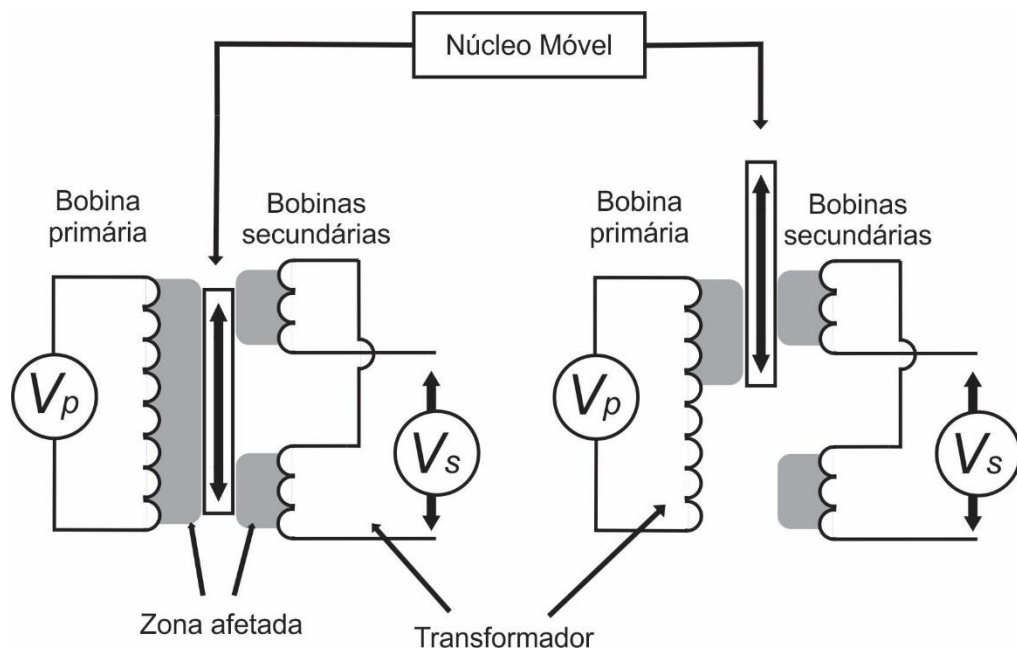
Pelas características da sua geometria, o processo de usinagem para a fabricação do carretel do LVDT é o mais indicado. O náilon pode ser aplicado pois apresenta propriedades mecânicas que atenderam as necessidades do projeto, além de garantir o isolamento elétrico entre as bobinas. Segundo Machado et al. (2009), usinagem é um processo de fabricação mais popular do mundo, no qual produzem objetos dentro de suas especificações de forma, tamanho e acabamento retirando-se o excesso de material, formando-se cavacos. Sendo o cavaco um fragmento de forma assimétrica, que foi retirado da peça usinada pela ferramenta de corte.

Considerando as propriedades elétricas juntamente com o custo de fabricação, tornam o cobre o principal material para fabricação de enrolamentos de um transformador em consequência de ser o segundo melhor condutor de eletricidade, ficando atrás somente da prata (CAPRERA, 2018). Além de apresentar resistência a corrosão (cobre esmaltado), fácil conformação, bem como em relação ao custo-benefício, o cobre é recomendado para confecção dos enrolamentos das bobinas do LVDT.

Os materiais magnéticos moles são utilizados em equipamentos que são submetidos a campos magnéticos alternados nos quais exigem pequenas perdas de energia. Além disso, são elementos que possuem característica de serem magnetizados e desmagnetizados com um campo relativamente pequeno. Um exemplo de sua aplicação consiste nos núcleos de transformadores. Já os materiais magnéticos duros são utilizados em ímãs permanentes por possuir alta resistência a desmagnetização, sendo as ligas de Neodímio-Ferro-Boro os materiais magnéticos de maior aplicação (CALLISTER JUNIOR, 2002).

Quando o núcleo ferromagnético se movimenta dentro do LVDT, um certo número de espiras é afetado pelo seu campo magnético, gerando-se uma tensão elétrica na saída (V_s) (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019), como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Esboço de um LVDT aberto.



Fonte: Autoria Própria

O primário é excitado por uma tensão de corrente alternada (CA) em uma frequência (geralmente em kHz), induzindo tensões no secundário. Ou seja, como já mostrado no esquema elétrico de ligação do LVDT na Figura 2, a tensão de excitação no primário (V_p) induz uma tensão no secundário (V_s) de acordo com a movimentação do núcleo. A frequência de excitação é determinada de acordo com as características do LVDT (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019). Segundo Halliday, Renick e Walker (2009), frequência é o número de oscilações por segundo, definido como uma oscilação por segundo, ter como unidade 1 Hertz.

3.2 METROLOGIA E ESTATÍSTICA APLICADAS À CARACTERIZAÇÃO DO LVDT

Segundo Albertazzi e Souza (2008), medir é um procedimento prático que determina a unidade de uma grandeza física, na qual é estabelecida de acordo com um padrão reconhecido conforme o Sistema Internacional de Unidades (SI), utilizando um instrumento de medição.

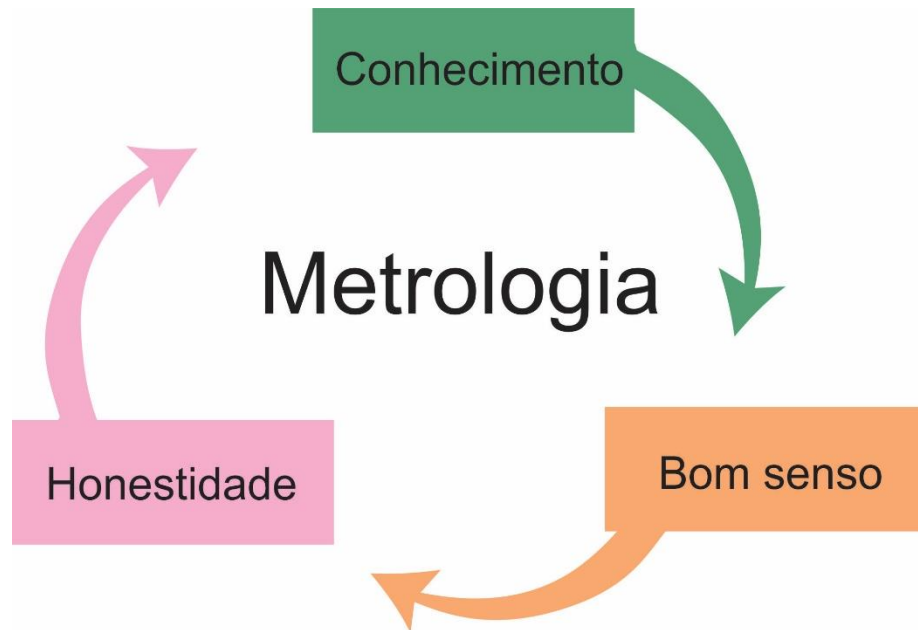
Para mensurar determinados fenômenos físicos, utiliza-se a medição para monitorar, comparar e/ou investigar. Monitorar consiste no registro dos valores do fenômeno, observando-se seu comportamento. Controlar é manter a grandeza física em um padrão pré-estabelecido, utilizando-se os valores do monitoramento e comparando-se com o de referência. Investigar é a forma de obter descobertas científicas por meio de experimentos e análise quando se obtêm resultados desconhecidos (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Para conseguir uma medição sem erros é necessário conseguir representar um sistema de medição perfeito para que de alguma forma pudesse controlar fatores ambientais, operando com equipamentos perfeitos, além de o experimento ter apenas um valor único. Na prática essas condições são de fato impossíveis de acontecer (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Todos os sistemas de medição geram erros. Podendo estes surgirem desde a sua manufatura, material, interferências e desgaste dos equipamentos. O resultado da medição gera um número, sendo de interpretação do operador saber se o valor mensurado se encontra na faixa de valores teoricamente esperados (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Na Figura 3, são expostos os pilares da metrologia que segundo Albertazzi e Souza (2008) são: Conhecimento, Bom senso e Honestidade. Portanto é de extrema importância além do conhecimento técnico de operação dos instrumentos utilizados a compreensão do que está sendo mensurado, ser honesto ao passar os dados de medição e noticiar se algo não está de acordo com o esperado e ter o bom senso na coleta e sempre atentar aos possíveis erros (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Figura 3 - Pilares da Metrologia.



Fonte: (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Há diversos exemplos de sistema de medição, desde medição de pequeno porte (paquímetro, temperatura) a grandes sistemas interligados (automação de uma fábrica, máquinas). Na Figura 4, é representado como funciona os módulos que fazem parte de um sistema de medição, utilizando o método da indicação (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Figura 4 - Módulos funcionais de um sistema de medição.



Fonte: (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

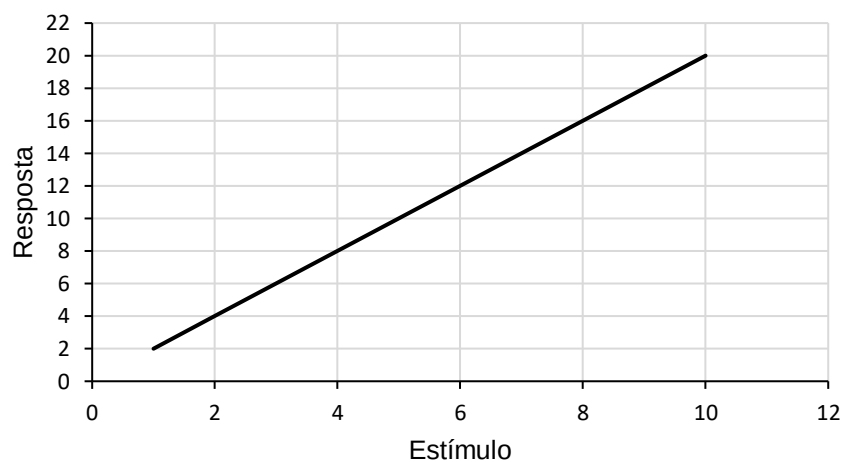
Segundo Albertazzi e Souza (2008), o transdutor ou sensor é o responsável por gerar o sinal da medição que está sendo realizada dependendo da sua característica, ou seja, o sinal de excitação (mecânico, elétrico, luminoso) é convertido em outro (usualmente elétrico) para ser medido. Em seguida, amplia-se o sinal gerado pelo transdutor, podendo-se aplicar filtros e compensações para que o fenômeno físico

medido seja observado com grandeza e intervalos maiores. Por fim, os dados mensurados são mostrados ao operador através de um dispositivo mostrador, que recebe as informações já tratadas transformando-se em um número compreensível e de fácil interpretação para o usuário.

Como já exposto, todos os sistemas de medição são passíveis de erro, ou seja, o sinal de entrada (estímulo) pode não estar de acordo com o sinal de saída (resposta), porém há algumas formas de tratá-los para uma melhor compreensão. (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Para obter um sistema de medição funcionando de forma correta, o estímulo relaciona-se de forma proporcional ao sinal de resposta. A relação entre o estímulo e a resposta é chamado de curva característica de resposta, (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). A Figura 5 ilustra esse comportamento ideal.

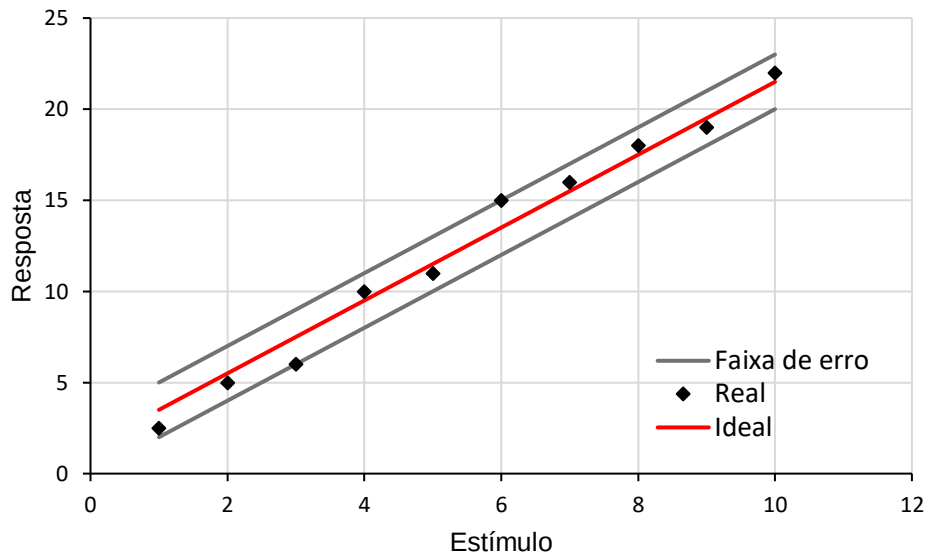
Figura 5 - Curva característica de resposta ideal.



Fonte: Adaptado de (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Na prática existe diversos fatores que influenciam ao comportamento não linear do estímulo com o sinal de resposta, provocando-se erros de leitura. Define-se então a curva característica de resposta real, que é uma representação de uma linha média como ilustrado na Figura 6, em uma faixa de dispersão (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Figura 6 - Curva característica de resposta ideal obtida através de regressão linear.



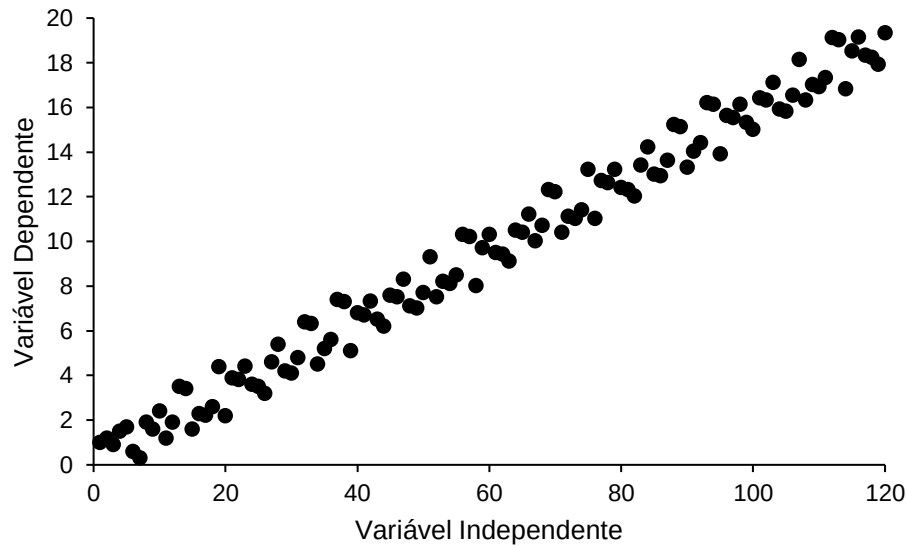
Fonte: Adaptado de (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

O principal causador dos erros em um sistema de medição é o transdutor/sensor. Para diminuir a imprecisão do instrumento é necessário procedimentos experimentais para levantar erros ao longo da faixa de medição, procedimento denominado de calibração. A calibração visa estabelecer sob condições especificadas, uma relação entre os valores mensurados e as incertezas de medição (SILVA NETO, 2012).

Alguns parâmetros são utilizados na prática para expressar e minimizar o erro sistemático apresentado pelo sistema de medição. A tendência e a correlação podem ser utilizadas para representar algumas características de um sistema de medição (SILVA NETO, 2012). Portanto utiliza-se de métodos estatísticos para a caracterização do instrumento.

Segundo Larson e Faber (2010), a estatística é a ciência que apura, organiza e investiga dados para tomar decisões. A correlação é a relação entre dois elementos que podem ser organizados em coordenadas cartesianas (x, y), através de um diagrama de dispersão. A variável independente (x) é representada no eixo horizontal e a variável dependente (y) é representada no eixo vertical, exposto na Figura 7.

Figura 7 - Correlação linear.



Fonte: Adaptado de (LARSON; FABER, 2010).

Para mensurar a relação e a força entre duas variáveis, utiliza-se o coeficiente de correlação, visto que fica abstrato saber a dependência de uma variável somente interpretando o gráfico de dispersão (LARSON; FABER, 2010). A Equação 1 representa o coeficiente de correlação amostral.

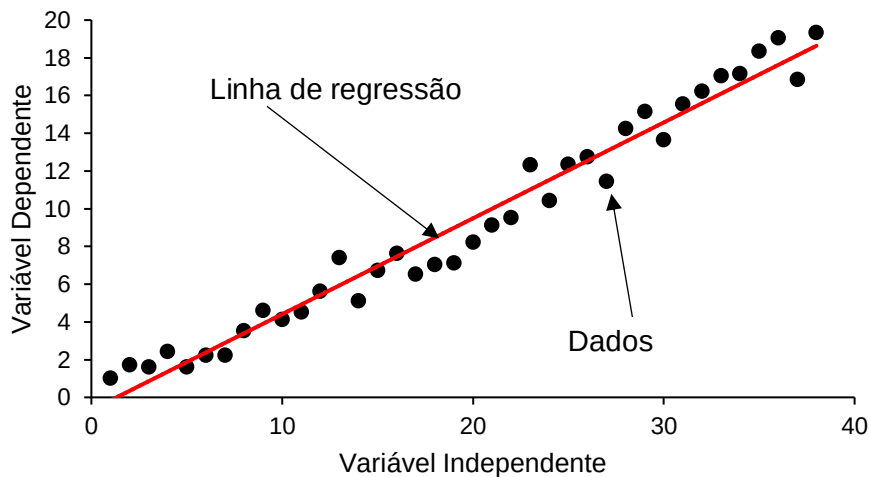
$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \sqrt{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2}} \quad (1)$$

onde n é o número de pares de dados.

Verificando-se que a correlação linear das variáveis é expressiva, define-se a equação da linha que melhor conforma os dados, denominada de linha de regressão. Também chamada de linha de melhor ajuste, é a linha na qual a soma dos quadrados dos resíduos é um mínimo (LARSON; FABER, 2010).

Resíduos são chamados as diferenças entre a variável dependente (y) observado para os valores (y) esperados, para um dado valor da variável independente (x). Caso os pontos se encontrem acima da linha de regressão, é chamado de resíduo positivo, estando abaixo é negativo. E quando o valor observado é igual ao previsto o resíduo é igual a zero (LARSON; FABER, 2010), conforme é mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Diagrama de dispersão e linha de regressão linear.



Fonte: Adaptado de (LARSON; FABER, 2010).

A equação de uma linha de regressão que relaciona uma variável independente (eixo x) e uma variável dependente (eixo y) é apresentada na Equação 2.

$$y = mx + b \quad (2)$$

onde:

$$m = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{n \sum X^2 - (\sum X)^2}} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum Y}{n} - m \frac{\sum X}{n} \quad (4)$$

3.3 HARDWARE E SOFTWARE UTILIZADO NA CONSTRUÇÃO DO LVDT

Um sistema de medição possui: Transdutor/sensor; Unidade de tratamento do sinal; e Dispositivo mostrador. Sendo o transdutor o responsável pela leitura dos dados mensurados e enviados a unidade de tratamento, que por sua vez realiza as devidas compensações e transmite para o dispositivo mostrador (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

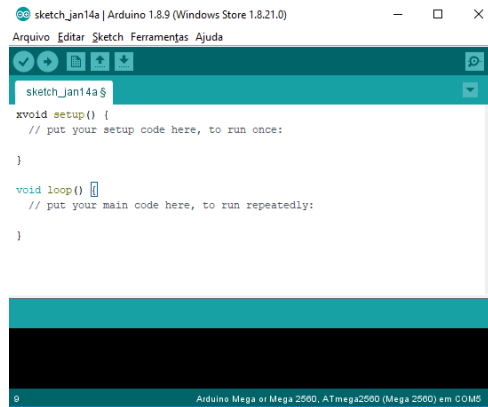
Como já mencionado na Secção 3.2, a maior fonte de erros é o transdutor/sensor. No intuito de reduzir os custos e minimizar os ruídos (que causam erros de leitura) circuitos dedicados a utilização juntamente com um LVDT foram desenvolvidos, destacando-se o AD598 e o AD698 da Analog Devices (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019).

O AD598 realiza todas as operações necessárias para processar os dados de sinal do LVDT. Sua frequência de oscilação varia de 20 Hz a 20 kHz, dependendo da necessidade e característica do equipamento (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019).

Para a unidade de transmissão dos dados de leitura do transdutor para o operador, utiliza-se placas de interface Arduino. Segundo Monk (2013), Arduino é uma placa de microcontrolador que possui comunicação via conexão USB, permitindo a ligação e controle de diversos dispositivos (máquinas, sensores etc) através da programação inserida na sua interface ou pelo computador.

A interface de programação do Arduino é o ambiente de desenvolvimento e programação do software que é baixado para a placa Arduino e pode ser utilizado em conjunto com o hardware, como dispositivo mostrador ou ainda, como mostrador e armazenador de dados. Na Figura 9 é apresentado a IDE (*Integrated Development Environment*) que é um software gratuito disponibilizado pela própria empresa, na qual o usuário consegue adicionar o algoritmo de comandos necessários de acordo com sua necessidade.

Figura 9 – Interface IDE do Arduino.



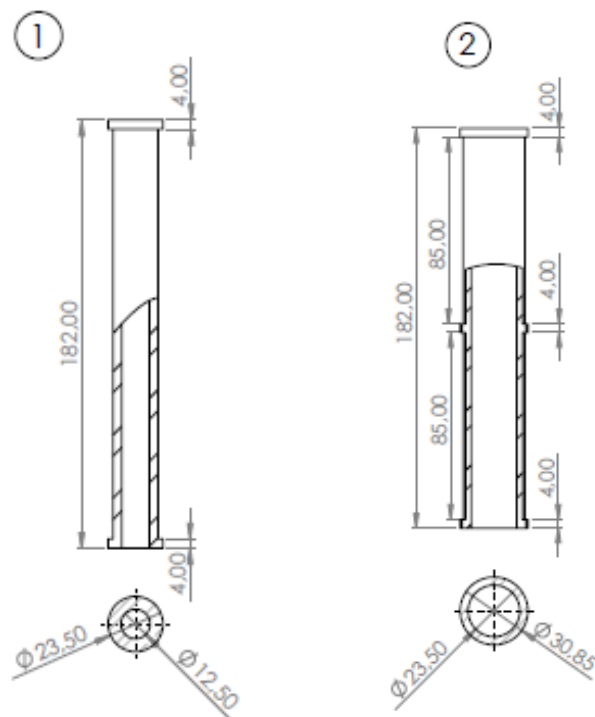
Fonte: (MONK, 2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CONFECÇÃO DO CARRETEL DO LVDT

O carretel do LVDT foi fabricado de acordo com as dimensões mostradas na Figura 10 para o primário (1) e secundário (2).

Figura 10 - Dimensões do carretel do LVDT.



Fonte: Autoria própria.

Selecionou-se o náilon como material do carretel por apresentar um melhor custo-benefício, além de atender as necessidades do projeto, conforme apresentado na Secção 3.1. Utilizou-se o processo de usinagem em torno convencional, apresentado na Figura 11.

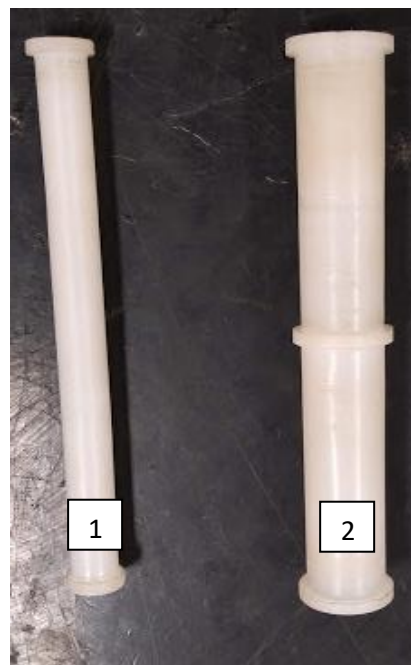
Figura 11 - Início da usinagem do carretel.



Fonte: Autoria própria.

O resultado é apresentado na Figura 12 para o primário (1) e secundário (2).

Figura 12 - Resultado da usinagem.



Fonte: Autoria própria.

4.2 CONFEÇÃO DO NÚCLEO FERROMAGNÉTICO DO LVDT

Para o núcleo do LVDT foi utilizado ferrosilício (material usualmente utilizado na estrutura de um transformador) devido as propriedades apresentadas na Secção 3.1. Foi realizado a desmontagem de um transformador em desuso (sucata) obtendo-se placas de ferrosilício. Para uma maior robustez foi necessário unir as placas com auxílio de solda elétrica, apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Processo de soldagem das chapas de ferrosilício.



Fonte: Autoria própria.

Para a conformação do núcleo, foi preciso usinar manualmente as chapas do material soldadas e o resultado final é mostrado Figura 14.

Figura 14 - Núcleo feito de chapas de ferrosilício.



Fonte: Autoria própria.

4.3 CONFEÇÃO DA HASTE DO LVDT

Devido ao extenso curso de deslocamento do LVDT, foi necessário confeccionar uma haste resistente aos esforços usuais exigidos. Para isso utilizou-se uma resina a base de polímero devido as características apresentadas na Secção 3.1.

Utilizou-se um processo artesanal para manufatura da haste e o produto final é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Haste do LVDT.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 16 é mostrado a fixação de uma rosca na ponta da haste para facilitar a montagem do equipamento em diversas aplicações, aproximando-se de um LVDT comercial.

Figura 16 - Detalhe da fixação da haste.



Fonte: Autoria própria

4.4 ENROLAMENTO DAS BOBINAS

Foi utilizado fio de cobre esmaltado conforme características apresentadas na Secção 3.1 e o adotou o tipo AWG-30 devido as características apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características do fio de cobre esmaltado.

Bitola do fio AWG Nº	Diâmetro (mm)	Secção (m ²)	Resistência a 20°C (Ω/km)
32	0,20	0,0314	549

Fonte: (AWG, 1973).

Para obter-se a uma tensão de saída equivalente a tensão de entrada, enrolou-se o primário e secundário com o mesmo número de espiras, assim obteve-se um número total de 2560 espiras para o primário e 2560 espiras para cada bobina do secundário.

Nas Figuras 17 e 18 é apresentado o estado final da bobina do primário e secundário, respectivamente. Após terem sido confeccionadas e enroladas no carretel o primário apresentou uma resistência de 89 Ω e o secundário 179 Ω, já que as bobinas são enroladas em série.

Figura 17 - Resultado do enrolamento da bobina do primário.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18 - Resultado do enrolamento das bobinas do secundário.



Fonte: Autoria própria.

4.5 MONTAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA

Na Figura 19 é apresentado a metodologia utilizada para a caracterização do elétrica do LVDT em bancada. Aqui se busca descobrir qual a melhor frequência de excitação.

Figura 19 - Fluxograma da montagem em bancada.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com a metodologia apresentada, foi realizado a montagem experimental. Inicialmente foi feita uma varredura de frequência para identificar a melhor frequência excitação do equipamento, buscando para uma posição fixa do núcleo qual a maior tensão induzida no secundário. Na Figura 20, é apresentado a montagem experimental da bancada.

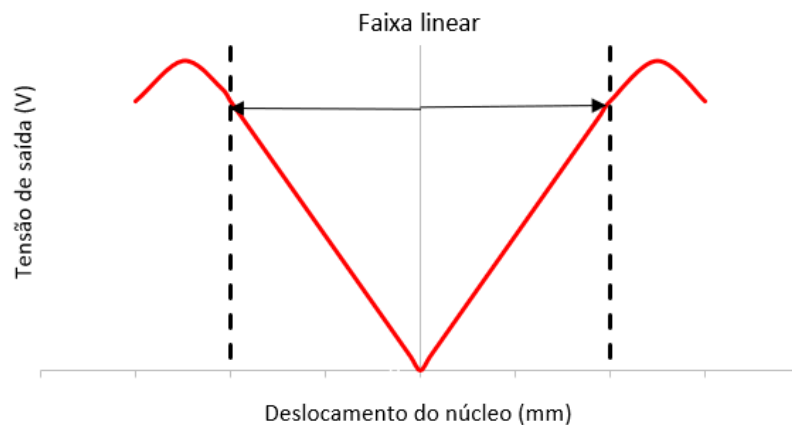
Figura 20 - Montagem experimental da varredura de frequência.



Fonte: Autoria própria.

Com o movimento do núcleo do LVDT, a indutância mútua entre primário e secundário varia, gerando-se uma tensão de saída linear diferencial, alterando-se assim a tensão no circuito como apresentado na Secção 3.1 e mostrado a Figura 21.

Figura 21 - Curva característica de um LVDT.



Fonte: Autoria própria.

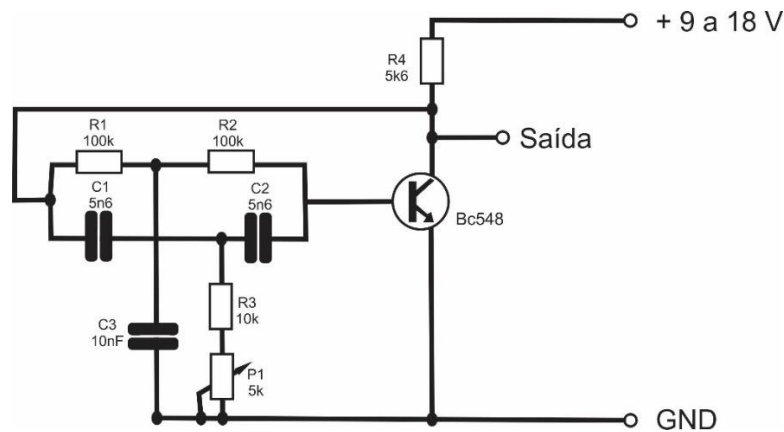
A frequência utilizada no oscilador foi selecionada através de uma varredura de frequência, na qual fixou-se a tensão e variou-se a frequência de excitação (1kHz a 100 kHz) obtendo-se a frequência de trabalho do LVDT. Após observar os resultados obtidos a tensão de excitação foi fixada em 1 Vpp e na saída foi utilizado-se uma ponte de diodo para retificar o sinal e conseguir leituras precisas na saída.

4.6 CONFEÇÃO DA ELETRÔNICA DO LVDT

4.6.1 Circuito oscilador

De acordo com os resultados obtidos na Seção 4.5, a frequência natural do equipamento ficou fora da faixa de trabalho do AD598, circuito este que seria utilizado para tratamento dos sinais do LVDT. Com isso foi necessário a confecção de um circuito oscilador externo para excitar a bobina do primário na frequência de excitação ideal. Na Figura 22 é mostrado o esquema elétrico do oscilador utilizado.

Figura 22 - Circuito oscilador de 1 kHz.



Fonte: (BRAGA, 2014).

A frequência do circuito depende de C1 e C2, em que ambos devem ter os mesmos valores e a forma do sinal de saída é uma onda senoidal com amplitude dependente do valor de R4. Na Figura 23 é apresentado o resultado da confecção do circuito impresso do oscilador.

Figura 23 - Circuito oscilador de 30 kHz.

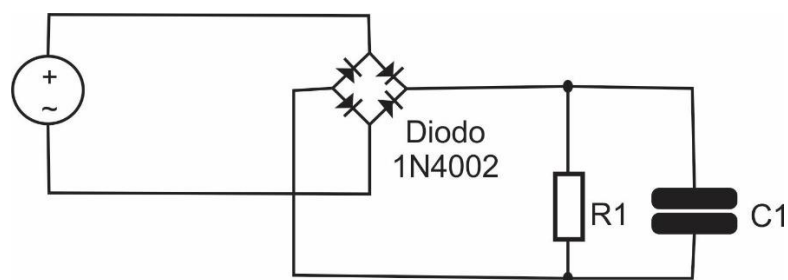


Fonte: Autoria própria.

4.6.2 Retificador de onda completa

A tensão de saída (V_s) depende do número de espiras conforme apresentado na Secção 3.1. Assim como o sinal de excitação é uma tensão senoidal, o sinal de saída será uma tensão senoidal de amplitude diferente dependendo do número de espiras, mas com mesma frequência de entrada. Para proporcionar um sinal de saída unipolar, é necessário utilizar um retificador de onda completa, apresentado na Figura 24.

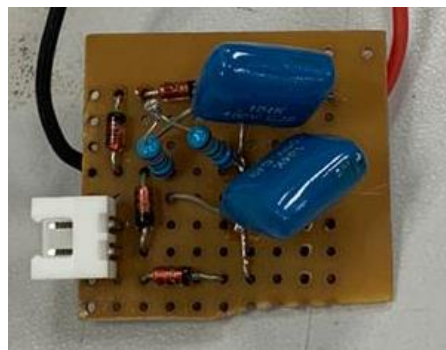
Figura 24 - Retificador de onda completa com filtro.



Fonte: (SEDRA, 2000).

Na Figura 25 é mostrado o resultado da confecção do retificador, utilizado na saída do LVDT.

Figura 25 - Resultado final do retificador de onda completa com filtro.

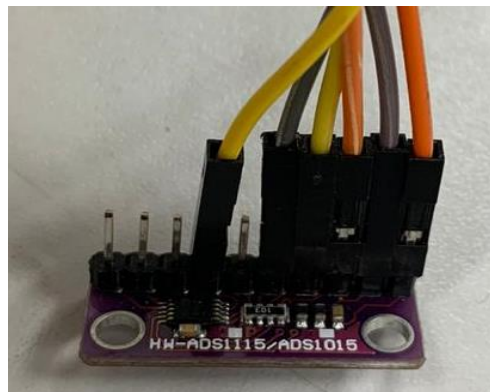


Fonte: Autoria própria.

4.6.3 Circuito amplificador

Para uma melhor exatidão das medidas realizadas pelo sensor, utilizou-se um amplificador operacional ADS1015 para obter-se um aumento do sinal de resposta e maior sensibilidade do sistema de medição. Na Figura 26 é apresentado o *shield* da plataforma Arduino utilizado para o tratamento dos sinais.

Figura 26 - Módulo ADS1015.

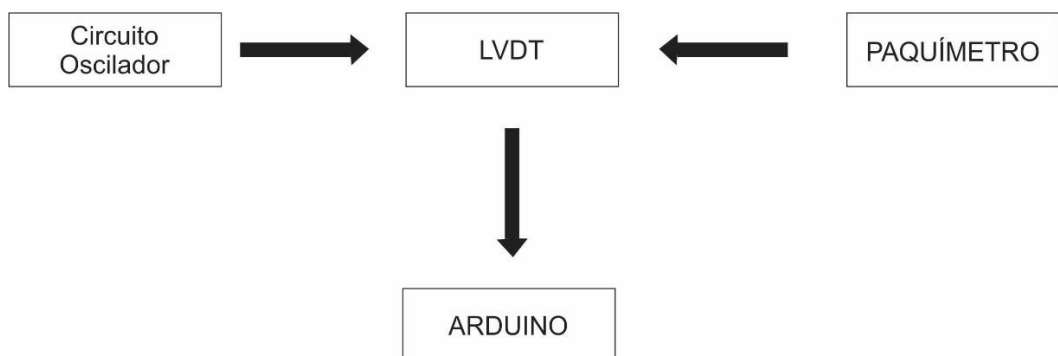


Fonte: Autoria própria.

4.7 COMPORTAMENTO DA TENSÃO DE SAÍDA EM FUNÇÃO DO DESCOLAMENTO

Na Figura 27 é apresentado a metodologia utilizada para a calibração do LVDT em bancada.

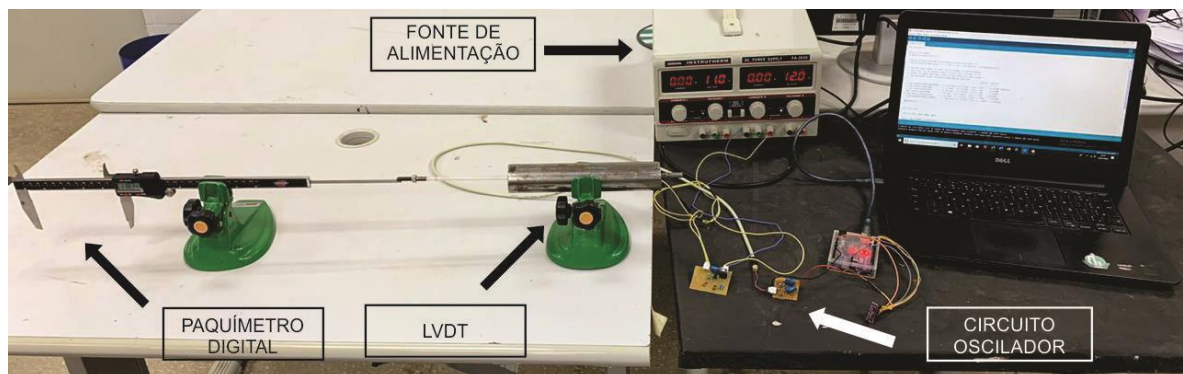
Figura 27 - Fluxograma da montagem em bancada.



Fonte: Autoria própria.

Para traçar as curvas de linearidade, foram realizadas varreduras com o núcleo do LVDT, ou seja, com auxílio de um paquímetro com resolução de 0,01 mm, o núcleo do foi deslocado em intervalos de 1 mm em toda sua extensão (Figura 28), assim de acordo com o deslocamento e as tensões induzidas exibidas na IDE do Arduino, foi obtido a faixa de trabalho com maior precisão do equipamento.

Figura 28 - Montagem da calibração.

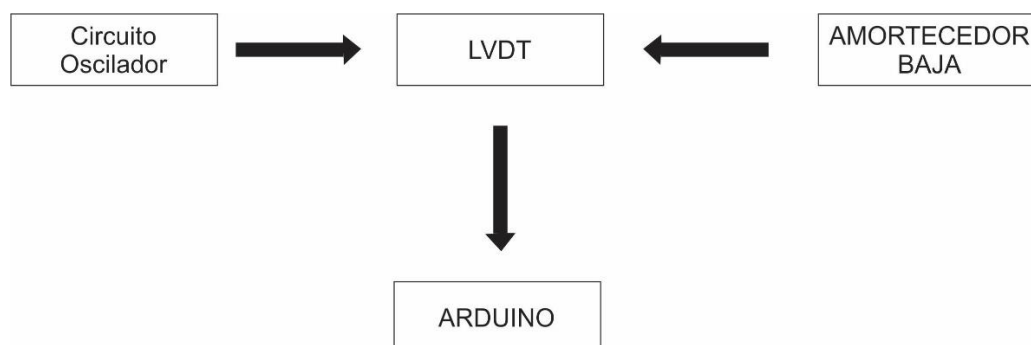


Fonte: Autoria própria.

4.8 MONTAGEM DO EXPERIMENTO DINÂMICO

Na Figura 29 é apresentado a metodologia utilizada para o teste dinâmico, aplicado a aquisição de dados no veículo Baja.

Figura 29 - Fluxograma da montagem dinâmica.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se uma semelhança no fluxograma do teste em bancada, porém na aplicação dinâmica a haste do LVDT será deslocada pelo movimento do amortecedor do Baja, de acordo com os obstáculos. Novamente, a tensão de excitação é gerada pelo circuito oscilador na frequência pré-estabelecida e de acordo com o movimento do núcleo/haste/amortecedor as tensões induzidas nas bobinas do secundário são mensuradas pelo Arduino.

Para o teste dinâmico, todos os equipamentos necessários para as leituras de deslocamento do amortecedor foram energizados pela bateria do veículo. Assim, através de um teste de transmissibilidade buscou-se constatar as frequências naturais de trabalho da suspensão.

Como já mencionado, com o movimento do núcleo/haste/amortecedor as tensões variam mensurando-se assim o deslocamento do sistema. Para obter uma melhor praticidade no experimento dinâmico foi utilizado o sistema de telemetria cedido pela Equipe Cactus Baja. Dessa forma, as leituras provenientes dos deslocamentos do amortecedor eram medidas e transmitidas via Wi-Fi. Nas Figuras 30 e 31 é apresentado a montagem do sensor no amortecedor.

Figura 30 - Vista frontal da montagem do LVDT no amortecedor traseiro.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - Vista lateral da montagem do LVDT no amortecedor traseiro.



Fonte: Autoria própria.

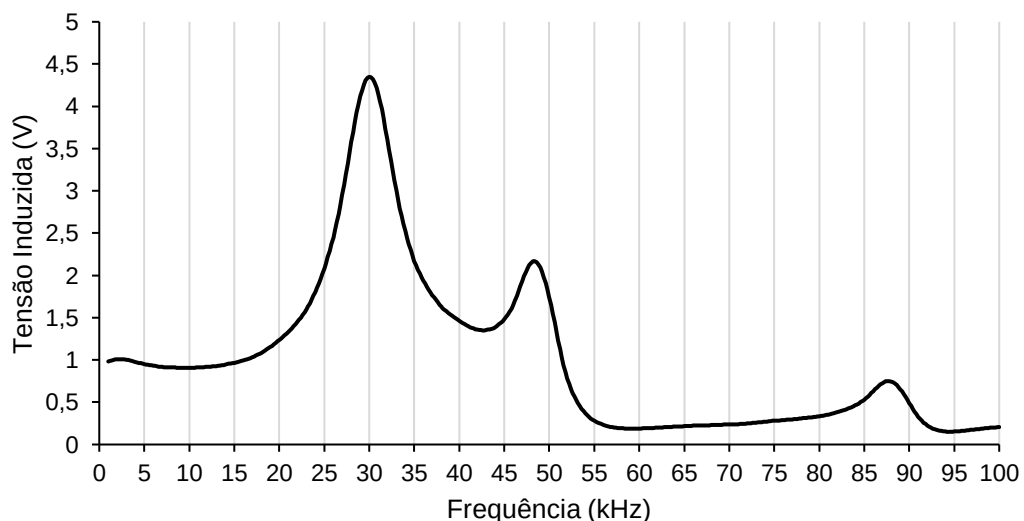
5 RESULTADOS E DISCURSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA

5.1.1 Amplitude de tensão induzida em função da frequência de excitação

A partir da primeira etapa descrita na Secção 4.5, obteve-se a curvas de resposta da amplitude da tensão induzida em função da frequência de excitação. Utilizou-se a varredura de frequência de excitação para analisar o comportamento do LVDT fixando-se a tensão 2 Vpp. Como mostra a Figura 32, destaca-se a frequência de 30 kHz, por apresentar maior excitabilidade quando se comparando as outras frequências testadas.

Figura 32 - Curva resposta frequência.



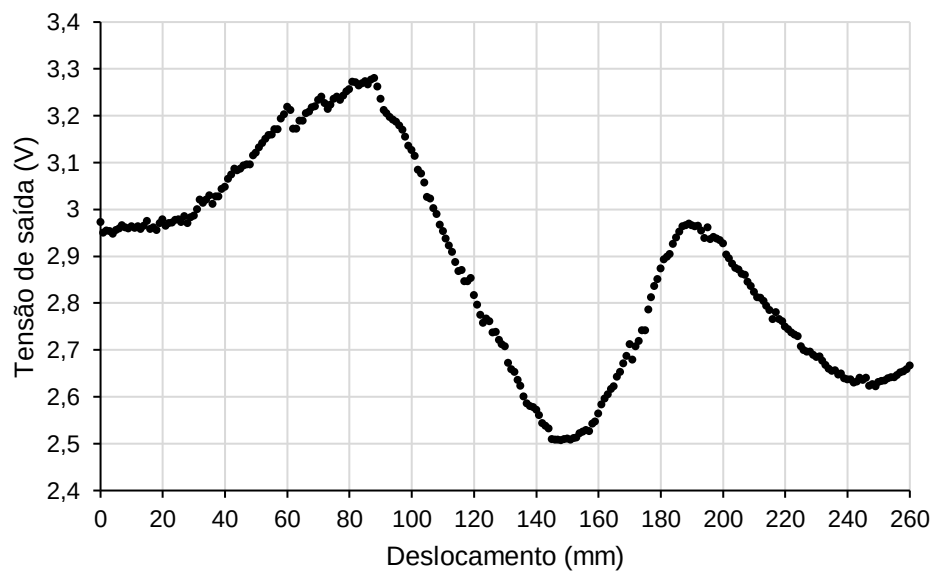
Fonte: Autoria própria.

Com base na frequência de excitação encontrada, confeccionou-se um circuito oscilador senoidal para a alimentação do primário do LVDT, como descrito na Secção 4.6. A utilização do AD598 ficou inviabilizada pois o LVDT apresentou uma frequência acima da faixa de trabalho do circuito integrado. A tensão de alimentação utilizada no gerador senoidal foi de 1 Vpp, visto que a tensão máxima de leitura do Arduino sem nenhum *shield* para regulagem de tensão é de 5 V.

5.1.2 Amplitude de tensão induzida em função do deslocamento

Para a calibração do sensor, utilizou-se os procedimentos apresentados na Secção 4.7. Com auxílio de um circuito oscilador, na faixa de frequência escolhida de acordo com a caracterização estática da Secção 5.1.2, deslocou-se o núcleo do LVDT com um paquímetro e as tensões de saída foram mensuradas pelo Arduino. Na Figura 33 é apresentado os resultados.

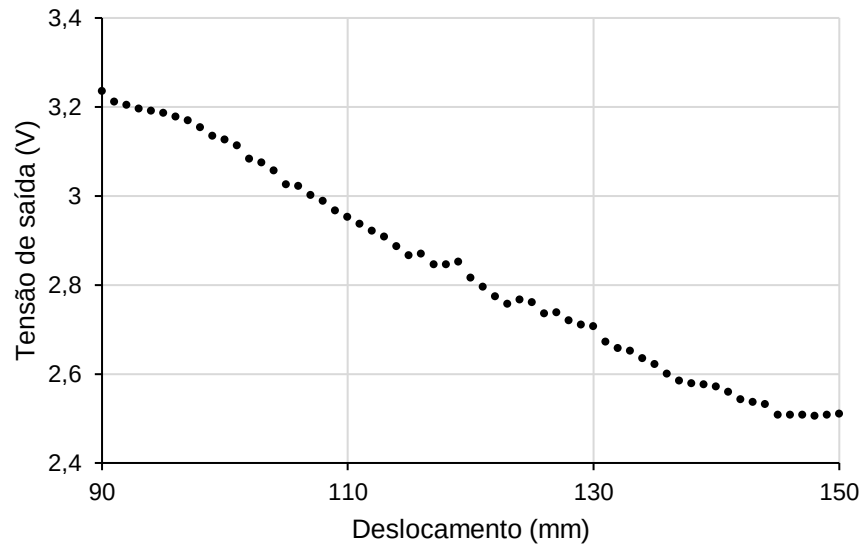
Figura 33 - Curva característica do deslocamento do núcleo.



Fonte: Autoria própria.

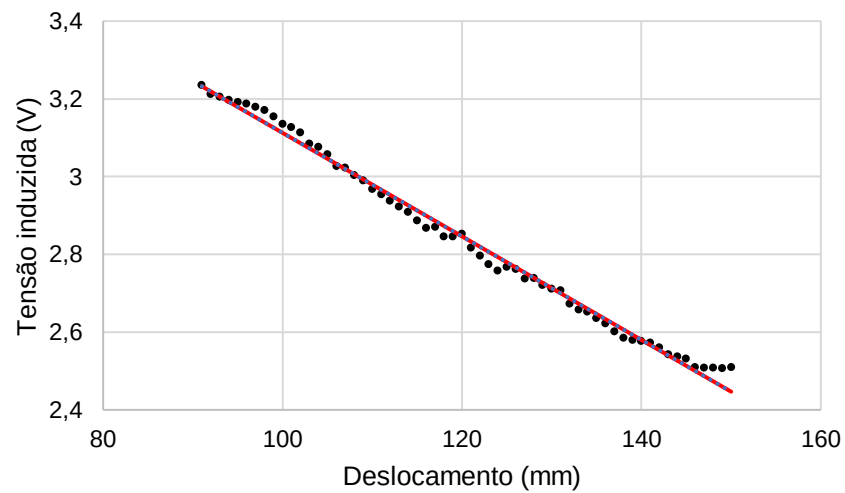
O LVDT apresentou uma linearidade do sinal de resposta em seu curso entre 90 mm e 150 mm, chegando a um deslocamento máximo em aproximadamente 60 mm. Na Figura 34 é ilustrado com detalhes os resultados obtidos.

Figura 34 - Faixa de deslocamento linear do LVDT.



Fonte: Autoria própria.

Figura 35 - Linha de regressão na faixa de deslocamento linear do LVDT.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Dados da regressão linear entre 90 e 150 mm.

	Inclinação		Intercepto		Estatística
	Valor	Erro	Valor	Erro	Coefficiente de correlação
Tensão induzida	- 0,0133	0,0002	4,4441	0,0268	0,9927

Fonte: Autoria própria.

Equação da linha de regressão:

$$y = -0,0133x + 4,4441 \quad (5)$$

De acordo com a Tabela 2, o coeficiente de correlação aponta uma relação linear excelente entre as variáveis.

5.2 APLICAÇÃO DINÂMICA

Para o teste dinâmico foi realizado os procedimentos de acordo com foi apresentado na Secção 4.8. Com toda eletrônica apresentada na Secção 4.6, instalou-se os equipamentos no veículo e os dados mensurados pelo LVDT foram transmitidos via telemetria. Na Figura 36 é mostrado a realização do teste.

Figura 36 - Baja transpondo uma manilha.



Fonte: Autoria própria.

Simulou-se obstáculos usuais encontrados nas competições Baja SAE e na Figura 37 é apresentado o resultado da aquisição de dados para a manilha.

Figura 37 - Dados da aquisição do Baja transpondo uma manilha.



Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto realizado foi de grande importância pois agregou muito conhecimento em teoria e prática na construção não só em um LVDT, mas em equipamentos de medição. Além dos conhecimentos adquiridos, foi visto na realização do trabalho as principais dificuldades na concepção de sensores confiáveis.

Os objetivos foram alcançados, visto que foi atingido um curso de deslocamento linear de 60 mm em grande resolução 20 mm acima do necessário dando margem para a montagem física no carro, validando-o a eficiência do sensor. A frequência de trabalho pode ser ajustada nas faixas de maior excitabilidade de acordo com os testes realizados. Além disso, foi possível instrumentar o carro com relativo baixo custo, se comparado ao valor comercial de um transdutor de deslocamento linear com essa mesma faixa de deslocamento útil.

Visto as dificuldades na confecção do sensor, segue uma lista das possíveis melhorias que poderão ser abordadas em projetos futuros:

- Investigar o motivo da descontinuidade nas regiões de 80 a 90 mm e acima de 150 mm.
- Ver a influência dos materiais de construção e geometria do LVDT na frequência de excitação;
- Realizar uma calibração dinâmica;
- Diminuição do ruído das interferências externas;
- Melhorar confecção do carretel e da haste.
- Aplicar em situações de baixa amplitude.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, Armando; SOUZA, André Roberto de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. Barueri: Manole, 2008.

AMERICAN WIRE GAUGE. **AWG**: Tabela de Conversão AWG. 4 ed. EUA, 1973.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2019. Volume 2.

BRAGA, Newton C. **Circuitos e informações**. São Paulo: Instituto Newton Braga, 2014. (Volume 2). Diagramação e Coordenação: Renato Paiotti.

CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2002. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares.

CAPRERA, Carlos Henrique Franco. **Comparativo entre enrolamentos de cobre e alumínio para transformadores elétricos**. 2018. 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Elétrica, Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, 2018.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2013. 612 p. Tradução de: Anatólio Laschuk.

GOZZI, Giuseppe Giovanni Massimo; PAREDE, Tera Milho Shiozaki; HORTA, Edson. **Eletrônica: Máquinas e Instalações Elétricas**. 3. ed. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011. 351 p.

HALLIDAY, David; RENICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

LARSON, Ron; FABER, Besty. **Estatística Aplicada**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MONK, Simon. **Programação com Arduino: começando com Sketches**. Porto Alegre: Bookman, 2013. Tradução: Anatólio Laschuk.

OLIVEIRA, Fabiano Sangi de. **Construção e Caracterização de Um Transdutor de Deslocamento Linear: Uma Abordagem Teórico-Experimental Multidisciplinar**. 2014. 88 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró, 2014.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. 4. edição. São Paulo, Makron Books Ltda, 2000.

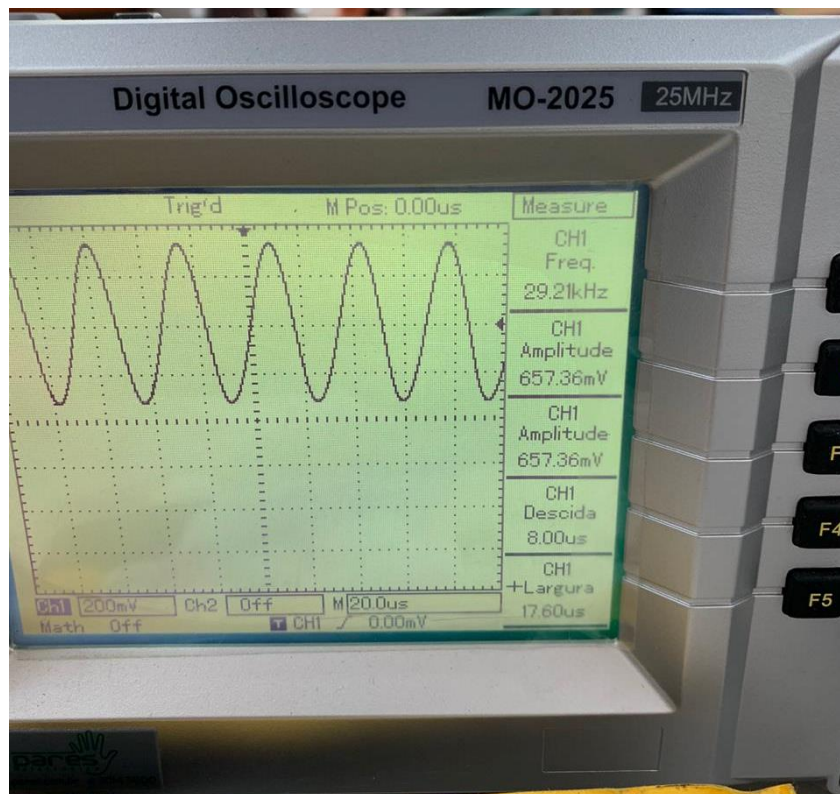
SILVA NETO, João Cirilo da. **Metrologia e Controle Dimensional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

VANAT, Karen Juliana; JÚNIOR, Aldo Braghini. **O Uso de Ferramentas de Metal Duro no Torneamento do Nylon**. 2014. Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Karen_Vanat2/publication/271165427_O_USO_DE_FERRAMENTAS_DE_METAL_DURO_NO_TORNEAMENTO_DO_NYLON/links/54ec74100cf2465f532f3c9d/O-USO-DE-FERRAMENTAS-DE-METAL-DURO-NO-TORNEAMENTO-DO-NYLON.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2019.

APÊNDICE A – FOTO DO PRODUTO FINAL – LVDT

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – FOTO DA TELA DO OSCILOSCÓPIO COM A FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO DO CIRCUITO OSCILADOR



Fonte: Autoria própria.