

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JULIANO DE PELEGRIN

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SENSOR DE DESLOCAMENTO
LINEAR PARA APLICAÇÃO EM UM SEGUIDOR SOLAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO
2016

JULIANO DE PELEGRIN

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SENSOR DE DESLOCAMENTO
LINEAR PARA APLICAÇÃO EM UM SEGUIDOR SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Jean Marc Stephane Lafay

PATO BRANCO
2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

Projeto e Construção de um Sensor de Deslocamento Linear Para Aplicação em um Seguidor Solar

Juliano de Pelegrin

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 02/12/2016 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Fábio Luiz Bertotti
(UTFPR-PB)

Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Jr.
(UTFPR-PB)

Prof. Dr. Jean-Marc Stephane Lafay
(UTFPR-PB)
Orientador

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

*A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso de engenharia mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus avós paternos e maternos Amélia e Osvaldo, Ivo e Maria Leocadia, “In Memoriam”, pela existência de meus pais, pois sem eles eu não teria chego até aqui. Ao meu amigo Rulian Martin Piovesan da Luz, “In Memoriam”, pela amizade, companheirismo e bons momentos vividos, que serão para sempre lembrados.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me deu saúde, disposição e sabedoria para a realização deste estudo, proporcionando momentos de felicidade e de dificuldade que me fizeram crescer como pessoa.

À minha família, pelo apoio e paciência durante mais esta etapa. A minha mãe, que sempre fez tudo por mim. Ao meu pai, por todo amor, conselhos e suporte. Ao meu irmão, pela forma que sempre me incentivou. A minha namorada, que esteve sempre ao meu lado, nos bons e maus momentos.

Aos professores, por serem tão importantes em minha vida acadêmica e pela sabedoria transmitida durante toda a graduação. Em especial, ao Professor Doutor Jean-Marc Stephane Lafay, pela orientação, dedicação e por não ter hesitado em passar seus conhecimentos e experiências, como também pela confiança em mim depositada.

Aos meus amigos e a todos que de alguma forma auxiliaram no decorrer deste trajeto.

EPÍGRAFE

Solar power is the last energy resource that isn't owned yet – nobody taxes the sun yet. (RAITT, Bonnie 2010).

Energia solar é a ultima fonte de energia que não está possuída ainda – ninguém tributa o sol ainda. (RAITT, Bonnie 2010).

RESUMO

DE PELEGRIN, Juliano. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM SENSOR DE DESLOCAMENTO LINEAR PARA APLICAÇÃO EM UM SEGUIDOR SOLAR. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Na atualidade, sistemas de captação de energia solar são cada vez mais comuns e necessários para a inovação dos sistemas de produção de energia, uma vez que fontes de energia renováveis serão a chave para a sustentabilidade e manutenção ambiental do futuro de nosso planeta. Neste contexto, surgem o Sistema de Concentração Solar Fresnel Linear, que utiliza espelhos planos para reflexão de raios solares com um baixo custo de construção. Aplicações que utilizam captação a partir desse sistema de concentração solar exigem a utilização de seguidores solares, para que se obtenha alta eficiência na reflexão da radiação sobre o concentrador. A partir da necessidade da utilização do seguidor em Sistemas de Concentração Fresnel Linear, esta pesquisa apresenta uma abordagem teórica e de construção de um sensor LVDT (Transformador Linear Diferencial Variável) que será utilizado para o monitoramento e caracterização de precisão do movimento realizado pelo espelho de captação de raios solares aplicado a essa tecnologia. A implementação do sensor será realizada com o intuito de alcançar tamanha precisão no seguidor solar, que seja o suficiente para uma posterior eliminação de concentradores secundários. O trabalho terá como foco principal o dimensionamento teórico e a construção de um sensor de deslocamento linear LVDT, para a aplicação em um seguidor solar com placas solares do tipo Fresnel. Conseqüentemente, serão abordados nesse trabalho os sistemas de concentração de energia solar.

Palavras-chave: Energia Solar. Sensor de deslocamento LVDT. Seguidor Solar. Captação de energia

ABSTRACT

DE PELEGRIN, Juliano. Design and Construction of a Linear Displacement Sensor for Application in a Solar Tracker. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

Nowadays solar energy captation systems are increasingly common and necessary for the innovation in the energy production systems, once renewable energy sources will be the key for the sustainability and environmental maintenance of the future of our planet. In this context, arise the Linear Fresnel Concentration System which uses plane mirrors to reflect the sun rays, and thus it has a low cost of construction. Applications that use captation from this kind of solar concentration system, they need the utilization of solar trackers in order to achieve high efficiency in the solar radiation reflection on the concentrator. From the necessity of the tracker utilization in Linear Fresnel Concentrator Systems, this research shows a theoretical and construction approach of a LVDT (Linear Variable Differential Transformer) which will be used for the monitoring and characterization of precision in the movement realized by captation mirrors of sunlight applied to this technology. The implementation of the sensor will be performed in order to achieve a high precision in the solar tracker. This precision should be sufficient for a subsequent elimination of secondary concentrators. The work will be mainly focused in the theoretical design and in the construction of a linear displacement sensor LVDT, for application in a solar tracker with solar panels type Fresnel. Consequently an approach in systems of solar energy concentration are parts mentioned in this research.

Keywords: Solar Energy. Linear Fresnel. Sensor LVDT. Solar Tracker. Energy captation.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 15 |
| 1.1 OBJETIVOS | 15 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 15 |
| 1.1.2 Objetivo Específico..... | 15 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 2.1 ENERGIA SOLAR | 16 |
| 2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica | 16 |
| 2.1.2 Energia Solar Térmica..... | 18 |
| 2.2 CONCENTRAÇÃO SOLAR..... | 19 |
| 2.2.1 História da Energia Solar Concentrada | 19 |
| 2.2.2 Definição de Concentração Solar | 20 |
| 2.2.3 Tecnologias de Energia Solar Térmica..... | 21 |
| 2.2.4 Cilindro Parabólico | 21 |
| 2.2.5 Disco Parabólico | 22 |
| 2.2.6 Torre Solar | 23 |
| 2.2.7 Fresnel Linear | 24 |
| 2.2.8 Fresnel Linear Compacto | 26 |
| 2.2.9 Comparação Entre as Tecnologias de Concentração Solar..... | 26 |
| 2.3 SEGUIDOR SOLAR | 27 |
| 2.3.1 Horário solar aparente..... | 27 |
| 2.3.2 Posição Solar | 28 |
| 2.3.3 Seguidor Solar..... | 31 |
| 2.3.4 Tipos de Seguidores Solar | 31 |
| 2.3.5 Sistemas de Captação de Energia Solar Termal Lineares..... | 32 |
| 2.4 TRANSFORMADOR DIFERENCIAL LINEAR VARIÁVEL | 33 |
| 2.4.1 Histórico do LVDT | 34 |
| 2.4.2 Constituição do LVDT..... | 34 |
| 2.4.3 Bobinas que Constituem o Enrolamento | 35 |
| 2.4.4. Polipropileno..... | 36 |
| 2.4.5 Núcleo do LVDT | 38 |
| 2.4.6 Ferrite | 39 |
| 2.4.7 Haste Acoplada ao Eixo | 40 |
| 2.4.8 Enrolamentos | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.9 Princípio de Funcionamento do LVDT..... | 40 |
| 2.4.10 Principais Características de um LVDT | 44 |
| 2.5 METROLOGIA | 46 |
| 2.5.1 Conceito de Metrologia..... | 46 |
| 2.5.2 Sistema de Medição | 47 |
| 2.5.3 Módulos Básicos de um Sistema de Medição | 47 |
| 2.5.4 Transdutor | 48 |
| 2.5.5 Unidade de Tratamento de Sinais | 48 |
| 2.5.6 Dispositivo Mostrador | 48 |
| 2.5.7 Qualidade de Medição..... | 49 |
| 2.5.8 Ensaio de calibração | 49 |
| 3. METODOLOGIA | 50 |
| 3.1 Identificação das características do LVDT | 51 |
| 3.2 Projeto do LVDT | 52 |
| 3.3 Construção do Sensor..... | 54 |
| 3.4 Caracterização do sensor LVDT | 68 |
| 4 RESULTADOS OBTIDOS | 72 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 92 |
| 6. REFERÊNCIAS..... | 94 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Produção mundial de células fotovoltaicas. | 17 |
| Figura 2 – Possíveis configurações de coletores concentradores..... | 21 |
| Figura 3 – Ilustração do conceito canal/cilindro parabólico. | 22 |
| Figura 4 – Ilustração do conceito disco-parabólico. | 23 |
| Figura 5 - Conceito Linear Fresnel..... | 24 |
| Figura 6 - Conceito Linear Fresnel..... | 25 |
| Figura 7 – Ilustração do conceito CLRF. | 26 |
| Figura 8 – Ângulos astronômicos para descrição da movimentação do Sol. | 29 |
| Figura 9 – Motor de passo com caixa redutora de velocidade. | 32 |
| Figura 10 – Exemplo de diferenças da geração de energia diária (esquerda) e eficiência (direita) entre sistemas LF e PT nas diferentes estações do ano..... | 33 |
| Figura 11 – Constituição de um LVDT. | 35 |
| Figura 12 – Disposição das bobinas primária e secundárias de um LVDT. | 35 |
| Figura 13 – LVDT em corte. | 41 |
| Figura 14 – Gráfico do módulo da tensão de saída em função da posição relativa do núcleo..... | 42 |
| Figura 15 – Zona afetada pelo deslocamento do núcleo..... | 43 |
| Figura 16 – LVDT do tipo <i>Ratiometric Wiring</i> | 44 |
| Figura 17 – Módulos funcionais de um sistema de medição que opera pelo método da indicação. | 48 |
| Figura 19 – Acoplamento do sensor no sistema de captação solar. | 52 |
| Figura 20 – Desenho 3D. Concepção do sensor sem carcaça. | 53 |
| Figura 21 – Desenho do carretel..... | 55 |
| Figura 22 – Usinagem a partir de um tarugo maciço de polipropileno | 56 |
| Figura 23 – Etapa de perfuração durante a usinagem do carretel. | 57 |
| Figura 24 – Formação de cavaco durante a usinagem do carretel | 58 |
| Figura 25 – Equipamento manual utilizado para enrolamento das bobinas. | 59 |
| Figura 26 – Ferrite..... | 60 |
| Figura 27 – Desenho do invólucro do núcleo. | 61 |
| Figura 28 – Usinagem da bucha para alocar o núcleo de ferrite..... | 62 |
| Figura 29 – Perfuração do invólucro do núcleo. | 63 |
| Figura 30 – Desenho da haste. | 64 |
| Figura 31 – Desbaste da haste. | 65 |
| Figura 32 – Usinagem de rosca na haste..... | 66 |
| Figura 34 – Usinagem dos apoios do carretel..... | 67 |
| Figura 35 – Projeto com a aparência final do sensor LVDT. | 68 |
| Figura 36 – Ensaio de deslocamento do núcleo para determinar a proporcionalidade. | 70 |
| Figura 37 – Carretel para enrolamentos das bobinas. | 72 |
| Figura 38 – Carretel e bobinas com proporção 1:1. | 72 |
| Figura 39 – Haste de aço inoxidável do sensor LVDT. | 73 |
| Figura 40 – Haste e núcleo acoplados..... | 73 |
| Figura 41 – Tampas e apoios frontal e traseiro do sensor LVDT. | 74 |
| Figura 42 – Componentes do sensor LVDT. Carretel com bobinas disposto internamente do tubo da carcaça. | 74 |
| Figura 43 – Formato final do sensor LVDT após montagem. | 75 |
| Figura 44 – Gráfico tensão x posição. Teste de proporcionalidade entre primária e secundárias. | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 45 – Gráfico tensão x frequência. Proporção 1:2 (550 espiras / 1100 espiras). | 77 |
| Figura 46 – Gráfico tensão x posição do núcleo, comparação entre configurações. | 79 |
| Figura 47 – Gráfico tensão x posição do núcleo. Comparação entre configurações. | 80 |
| Figura 49 – Tensão x frequência. Proporção 1:2 (1300 : 2600 espiras)..... | 82 |
| Figura 50 – Gráfico tensão x posição do núcleo. Comparativo entre frequências aplicadas. | 83 |
| Figura 51 – Gráfico tensão x posição do núcleo. F = 1 KHz, V = 2 Vrms. Haste de inox 304..... | 84 |
| Figura 52 – Gráfico tensão x frequência. 1500 / 3000 espiras. Haste de aço inox 304. | 85 |
| Figura 53 – Tensão x posição do núcleo. 1500 / 3000 espiras. Haste de inox 304...86 | |
| Figura 54 – Tensão x posição do núcleo. Comparativo entre melhores resultados (Inox 304 x Alumínio). | 87 |
| Figura 56 – Tensão x posição do núcleo. Testes com carcaça..... | 90 |
| Figura 57 – Tensão x Posição do núcleo. Comparativos entre testes com e sem a carcaça..... | 91 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 01 – Comparação Entre os Sistemas de Concentração..... | 17 |
| Tabela 02 – Propriedades do Polipropileno | 38 |
| Tabela 03 – Materiais utilizados em cada componente do sensor LVDT..... | 52 |
| Tabela 04 – Parâmetros de usinagem para o carretel. | 56 |
| Tabela 05 – Especificações técnicas sensor Opkon modelo LPT 100..... | 68 |
| Tabela 06 – Dados técnicos indicador digital COEL HW 7000..... | 68 |
| Tabela 07 – Valores de indutâncias e resistência em cada configuração..... | 75 |
| Tabela 08 – Indutâncias e resistências das bobinas em cada configuração..... | 78 |
| Tabela 09 – Configuração final do sensor LVDT..... | 87 |
| Tabela 10 – Comparativo entre teste de frequência, com e sem carcaça | 89 |

1 INTRODUÇÃO

Em engenharia, a captação de energia solar vem sendo muito estudada como uma riquíssima fonte de energia renovável. Assim, a concentração de energia por meio de refletores solares pode ser a chave para um futuro promissor na geração de energia elétrica a partir do sol. Nesse meio existem diversos tipos de espelhos refletores, entre os quais se destacam as lentes Fresnel, que aparecem como opção de baixo custo. Contudo, em contrapartida, apresentam um baixo rendimento em comparação a outros sistemas. Nesse contexto, para a otimização de um sistema concentrador solar a partir de lentes Fresnel, a utilização de seguidores solares passa a ser uma alternativa, tendo em vista o aumento do rendimento do sistema. Assim, para se obter uma excelente produção de energia solar, com utilização de um seguidor solar acoplado a lentes Fresnel, é necessário um acompanhamento preciso, a partir de medição de precisão.

A medição de precisão permite melhorias em projetos de máquinas, de equipamentos e de processos graças a condição de precisão e confiabilidade no entendimento dos mais diversos processos físicos. Assim, a partir do melhor entendimento do processo se obtém a utilização de forma mais racional de energia e melhoria na qualidade de produtos. A humanidade sempre teve a necessidade de mensurar grandezas como estado de equilíbrio, movimento de sólidos e gases dos sistemas para construir, relacionar, nivelar, equiparar, manter e utilizar corretamente recursos e equipamentos do mundo real. A realização de pesquisas de sensores de medição é, portanto, fundamental para garantir avanços nas ciências, na indústria e nas tecnologias futuramente inventadas, uma vez que, nessa área, os trabalhos acadêmicos são pouco divulgados, pois a maioria dos modelos desenvolvidos são considerados segredo industrial. Poucas empresas detêm informações e estudos sobre a tecnologia e a divulgam somente quando e como lhes convém. No segmento de transdutores de medição existem, também, muitos dispositivos protegidos por patente, o que é uma boa fonte de informação.

O Transformador diferencial variável linear (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) é utilizado na medição de deslocamento linear. Este sensor pode ser utilizado em diversas aplicações como: suspensão de automóveis na indústria automotiva (RAJAMANI & HEDRICK, 1995); em medições de abalos

sísmicos (SALAPAKA, 2002); na ortodontia (BÜHLER, OXLAND, & NOLTE, 1997); em próteses femurais na medicina (DELONG & DOUGLAS, 1991); em deformações em armações de concreto na engenharia civil (HO & PAM, 2003); no sistema de posicionamento de braços robóticos, entre outras aplicações nas quais se torna necessária a realização de medições físicas de precisão.

Assim, surge a possibilidade do uso do LVDT para a medição de precisão em seguidor solar, auxiliando no rastreamento solar.

1.2 JUSTIFICATIVA

No intuito de promover a utilização racional de energia e a procura de um método mais eficiente para produção de energia solar, surge a ideia de captura de energia utilizando seguidores solar. A partir do acompanhamento do movimento dos raios solares, existe a necessidade de medição do deslocamento realizado pela placa de captação para uma eficiente geração de energia. Nesse contexto, surge a possibilidade de utilização e construção de um LVDT (Transdutor Diferencial Linear Variável), pois apresenta diversas características que o tornam extremamente recomendável para aplicação como um sensor de medição de precisão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo construir um sensor de deslocamento linear do tipo LVDT, com recursos convencionais, capaz de melhorar a eficiência da reflexão dos raios solares em sistemas Fresnel.

1.1.2 Objetivo Específico

- Identificar as principais características que afetam o projeto de transdutores eletromecânicos
- Projetar um LVDT de modo a garantir a precisão requerida para a aplicação em um seguidor solar.
- Construir um LVDT.
- Caracterizar e calibrar o protótipo de LVDT.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA SOLAR

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2005), quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustível fóssil e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica.

De acordo com o Manual sobre energia fotovoltaica (GREENPRO, 2004), o Sol fornece energia na forma de radiação, que é a base de toda a vida na Terra. No centro do Sol, a fusão transforma núcleos de hidrogênio em núcleos de hélio. Durante esse processo, parte da massa é transformada em energia. O Sol é, assim, um enorme reator de fusão.

Toda essa energia gerada pela irradiação solar pode ser convertida diretamente em energia elétrica por meio de efeitos em determinados materiais, entre os quais se destacam os termoelétricos e fotovoltaicos.

Simplificadamente, a conversão de energia solar em energia elétrica, a partir do efeito termoelétrico, é caracterizada pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais em condições específicas. Já na geração de energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica por meio de uso de células solares (ANEEL, 2005, p. 29).

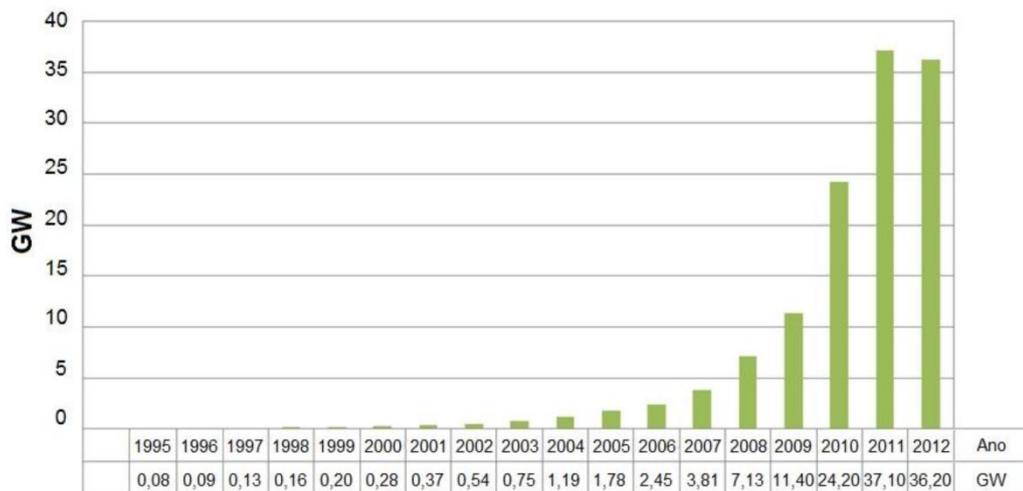
2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839, por Edmond Becquerel, a partir de um experimento o cientista constatou que placas metálicas, de platina ou prata, imersas num eletrólito geravam uma pequena diferença de potencial quando expostas a luz (Câmara, 2011, p. 14). Segundo o Manual de Engenharia de Sistemas Fotovoltaicos (CRESESB, 2014, p. 52), no ano de 1876 foi desenvolvido o primeiro aparato fotovoltaico, proveniente dos estudos da física do estado sólido e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial desses sistemas de geração de energia, seguindo o crescimento da área de engenharia eletrônica.

A energia solar fotovoltaica se baseia na conversão, em eletricidade, da energia contida nos fótons de luz quando incidem sobre um painel composto por materiais semicondutores (Sánchez Tapia, 2011, p. 09). Segundo Jonas & Gazoli (2012), os sistemas fotovoltaicos essencialmente são baseados em módulos ou painéis compostos de células fotovoltaicas, esses mecanismos realizam a captura da energia solar e produzem uma corrente elétrica.

Apesar de haver uma enorme incidência de raios solares no nosso planeta, a energia solar para produção de energia elétrica ainda é pouco utilizada. Nos países desenvolvidos esse cenário vem mudando com incentivos para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Nos últimos onze anos, a indústria de células e de módulos fotovoltaicas apresentou um crescimento anual médio de 54,2%. A Figura 1 representa a evolução da produção mundial de células fotovoltaicas (CRESESB, 2014, p.54).

Figura 1 – Produção mundial de células fotovoltaicas.



Fonte: Adaptado de (Roney, 2013).

O Brasil possui uma enorme extensão territorial e, conseqüentemente, uma elevada taxa de insolação devido a sua posição geográfica. Segundo Jonas & Gazoli (2012), diante do posicionamento geográfico e da alta incidência de raios solares é razoável esperar que o Brasil possua um potencial pelo menos dez vezes superior à capacidade instalada na Alemanha atualmente. Os autores também complementam que isso representaria algo em torno de 200 GW de eletricidade gerada a partir da luz solar e que este número representa aproximadamente o dobro de toda a capacidade de geração instalada no país atualmente.

Não obstante a capacidade teórica de produção, a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, em seu relatório elaborado em 2012 (ABINEE, 2012), cita que o ritmo de crescimento da demanda nacional continuará lento devido aos seguintes fatores:

- O custo de geração do Sistema fotovoltaico ainda não é competitivo;
- O custo para instalações residenciais é elevado;
- As distribuidoras de energia impõem restrições à micro e mini geração por medo de perda de mercado;
- Existem poucas políticas específicas de financiamento;
- Os consumidores não possuem conhecimento sobre a fonte fotovoltaica como opção de geração de energia elétrica.

Contudo, estima-se que o Brasil poderá se tornar um dos líderes mundiais na utilização de energias renováveis alternativas, devido a seu imenso potencial fotovoltaico. Apesar de o país possuir uma matriz de geração de energia relativamente limpa, essa situação não se manterá sem o uso de novas fontes de energia. Além disso, as condições favorecem o país para o crescimento da energia fotovoltaica, mais do que uma fonte alternativa, a energia fotovoltaica é uma alternativa viável e promissora para realizar a ampliação e complemento na geração de eletricidade no Brasil (JONAS & GAZOLI, 2012, p. 54).

2.1.2 Energia Solar Térmica

A energia solar térmica consiste em aproveitar o calor produzido pelos raios solares. Esse aproveitamento pode ser realizado de distintas formas por meio de diversas tecnologias (SANCHEZ TÁPIA 2011, p. 11).

A principal diferença entre a energia fotovoltaica e a térmica se dá pelo fato de que na energia fotovoltaica há uma conversão direta para energia elétrica, sem a necessidade de trocadores de calor e equipamentos mecânicos. Já na energia térmica há a necessidade de sistemas mais complexos tais como coletores, seguidores etc., dependendo de um sistema para converter energia solar em elétrica (REVELO, 2015, p 02).

Existe, ainda, uma diferenciação entre a energia solar térmica de baixa, média e alta temperatura.

A energia solar térmica de baixa temperatura (<80°C) tem sua principal aplicação em aquecimento de água doméstico, todavia, existem outras aplicações possíveis como o aquecimento de piscinas e os usos industriais em refrigeração e calefação que são cada vez mais demandados. Já com a energia solar térmica de alta temperatura (>100°C) existe a possibilidade de aproveitamento tanto térmico como elétrico. O aproveitamento térmico consiste em concentrar a radiação solar, aproveitando a sua energia térmica, e, assim, fazer uso de turbinas para transformar em energia elétrica. Alguns exemplos são os fornos solares, os sistemas de dessalinização entre outros. Por fim, o aproveitamento elétrico da energia solar é realizado graças as turbinas de vapor, gerando o que chamamos de energia solar termoelétrica (SANCHEZ TAPIA, 2011, p. 10).

2.2 CONCENTRAÇÃO SOLAR

2.2.1 História da Energia Solar Concentrada

O mais antigo relato de utilização de energia solar é a lendária história de que Arquimedes, fez o uso de raios solares refletidos por espelho para incendiar os barcos da frota Romana, na Batalha de Siracusa, no ano de 213 A.C., fato não confirmado por nenhum historiador. O primeiro relato famoso historicamente registrado é de que, em 1515, Leonardo da Vinci idealizou e desenhou vários modelos de concentradores solares. Seguiram-se outros como Buffon que, no ano de 1747, juntou 168 espelhos móveis, orientando a luz refletida para concentrá-la (GARCIA, 2013, p. 14).

Apenas um século após essas experiências ocorreu a primeira tentativa de geração elétrica com base na concentração de raios solares. A primeira e bem-sucedida tentativa ocorreu em 1870, feito realizado pelo engenheiro Sueco-Americano John Ericsson, que construiu um coletor cilindro parabólico (PTC) que entregava vapor diretamente para um pequeno gerador de 373 Watts. No entanto, nem o engenheiro nem os seus sucessores conseguiram superar o preço imbatível na época do carvão, proveniente da revolução Inglesa e acabaram abandonando suas experiências por falta de incentivos. Após o primeiro teste bem sucedido,

muitos outros cientistas passaram a projetar diversos meios para geração elétrica tendo por base a da energia solar (SAINT GOBAIN, 2012).

Segundo Müller-Steinhager & Hans Trieb (2004), a partir do século XX campos solares passaram a ser construídos e, atualmente, a geração de energia elétrica a partir da energia solar, por meio de concentração, é indispensável para a manutenção e produção de energia renovável.

2.2.2 Definição de Concentração Solar

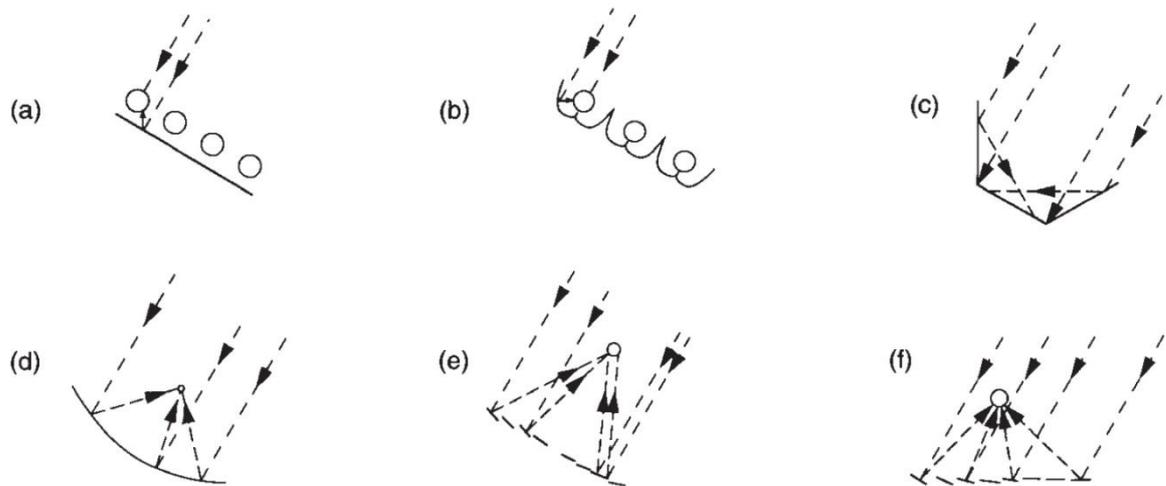
A CSP (Concentrated solar Power) consiste em concentrar a energia solar térmica em uma área reduzida por meio de lentes ou espelhos. A partir dessa concentração uma enorme quantidade de calor é gerada, produzindo vapor, assim, ao acoplar, por exemplo, uma turbina a vapor ligada a um gerador elétrico pode-se gerar energia elétrica. Também existem concentradores solares aplicados para geração fotovoltaico conhecidos como CPV (Concentrated Photovoltaic) (SOARES NEGREIROS, 2015, p. 25).

Segundo Brownson (2014), concentração solar constitui a manipulação eficaz dos fótons extraídos a partir de uma área de grande porte até um receptor de área menor.

Existem diversos tipos de concentradores solar para aumentar o fluxo de radiação sobre os receptores, os quais podem ser divididos em refletores ou refratores. Segundo Garcia (2013), nos concentradores refletores a radiação solar é refletida para o foco ao colidir no concentrador, já nos refratores os raios solares são refratados para o foco ao colidir no concentrador. Segundo o autor, são exemplos de concentrador solar refletor e refrator respectivamente: disco parabólico e concentradores de lentes de Fresnel.

Os concentradores podem ser cilíndricos com foco em uma linha ou circular com foco em um ponto. Os receptores podem ser côncavos, planos ou convexo. Na Figura 2 seis configurações são demonstradas (DUFFIE, BECKMAN & WOREK, 2003, P. 323).

Figura 2 – Possíveis configurações de coletores concentradores.



Fonte (Duffie et al., 2003).

As seguintes configurações estão dispostas na figura 02:

- A. Absorvedores tubular com refletor difuso
- B. Absorvedores tubular com refletores côncavos
- C. Receptor plano com refletores planos
- D. Concentrador parabólico
- E. Refletor Fresnel
- F. Matriz de espelhos inclinados com central receptiva.

2.2.3 Tecnologias de Energia Solar Térmica

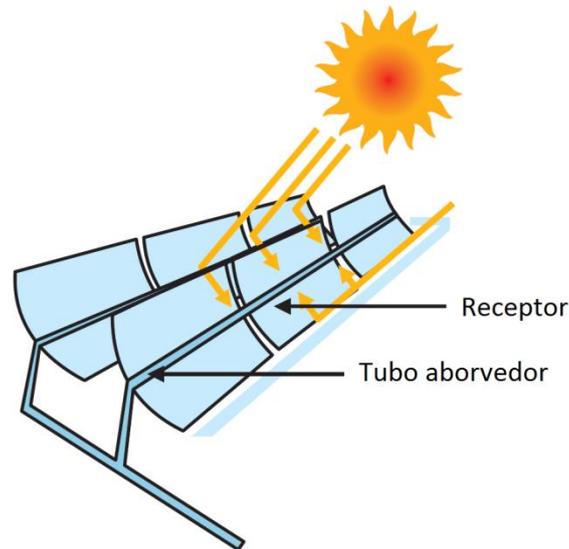
Apesar das diversas tecnologias de concentração solar, será dado destaque a quatro delas, que são dominantes no ramo da energia solar termoelétrica de concentração (CSP).

2.2.4 Cilindro Parabólico

Segundo Garcia (2013), as centrais do tipo cilindro parabólico correspondem a maior parte de toda a capacidade instalada no mundo todo. O autor ainda cita que o mercado mundial é dominado por esse tipo de centrais, contribuindo para que

essa seja a tecnologia de concentração solar mais desenvolvida até o momento. A Figura 3 representa um sistema do tipo cilindro parabólico.

Figura 3 – Ilustração do conceito canal/cilindro parabólico.



Fonte - adaptado de IEA (2010).

Os sistemas de canal cilindro/parabólico utilizam refletores num formato cilindro parabólico para concentrar a radiação solar num tubo absorvedor de calor, no qual a energia é transferida para um fluido de transferência de calor. Esse fluido transporta a energia térmica até um mecanismo coletor de calor que vai trocar essa energia com a água de alimentação proveniente do ciclo central. Normalmente este tipo de concentrador encontra-se em sistemas solares integrados com ciclo combinado, os quais utilizam o calor gerado pelos coletores solares como suplemento ao calor desperdiçado na turbina a gás, como forma de aumentar a capacidade de produção de vapor no ciclo de Rankine (IEA, 2010, p. 11).

Normalmente, estes sistemas são projetados para serem instalados com o seu eixo segundo uma orientação Norte-Sul e efetuam o seguimento do sol em um só eixo, segundo a direção Leste-Oeste.

2.2.5 Disco Parabólico

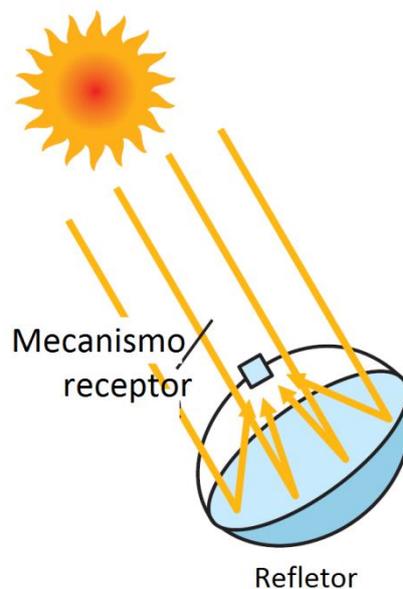
Para a Agência de Energia Internacional (IEA, 2010) os discos parabólicos oferecem a melhor performance na conversão de energia solar em elétrica de todos

os sistemas de concentração solar. Diversas características como o tamanho compacto, a ausência de água de refrigeração e a baixa compatibilidade com armazenamento termal e hibridação com sistemas de geração de vapor, colocam os discos parabólicos em competição com módulos fotovoltaicos, especialmente com os sistemas fotovoltaicos concentradores.

Esse sistema é formado por vários segmentos de espelhos curvos, agrupados de um modo que no final formem um disco de formato parabólico. Esse tipo de tecnologia geralmente possui no seu ponto focal um motor Stirling, que realiza a conversão do calor presente no seu ciclo térmico em energia mecânica, o que aciona um gerador elétrico clássico e produz energia elétrica (GARCIA, 2013, p. 19).

A Figura 4 abaixo representa o conceito disco-parabólico.

Figura 4 – Ilustração do conceito disco-parabólico.



Fonte – Adaptado de IEA (2010)

2.2.6 Torre Solar

Segundo De Laquil (1993), a concentração solar em torre central consiste em espelhos refletivos individuais que direcionam a radiação solar direta incidente para a parte superior de uma torre central. Na parte superior da torre é posicionado um receptor desenhado para absorver energia e transferi-la para um fluido termodinâmico.

A Figura 5 ilustra uma planta instalada na Espanha localizada em Sevilla.

Figura 5 - Conceito Linear Fresnel



Fonte – (CIEMAT, 2013).

O poder de concentração da torre solar alcança temperaturas elevadíssimas, o que aumenta a eficiência em que o calor é convertido em eletricidade e reduz os custos de armazenamento termal. Além disso, essa concepção é altamente flexível e possibilita a escolha de uma grande variedade de refletores, receptores, e fluidos de transferência de calor (IEA, 2010, p. 12).

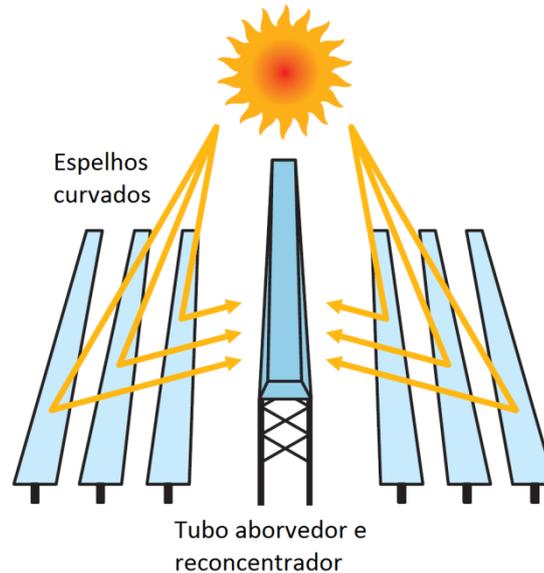
2.2.7 Fresnel Linear

O refletor linear Fresnel recebe esse nome devido as lentes Fresnel, que foram desenvolvidas pelo físico Francês Augustin-Jean Fresnel no século XVIII. O princípio dessas lentes são os cortes contínuos da superfície de uma lente padrão em várias superfícies com descontinuidades entre elas. Isso permite uma considerável redução de espessura, logo o peso e o volume das lentes também são reduzidos, com o custo de redução da qualidade de imagem das lentes (GUNTHER, 2011, p. 06).

A diferença do sistema linear Fresnel para o de canal parabólico está, basicamente, nos espelhos planos ou ligeiramente curvados que, tendo por base o princípio das lentes de Fresnel, recriam virtualmente o perfil de uma parábola (GARCIA, 2013, p. 18).

A Figura 6 ilustra o conceito de um sistema linear Fresnel.

Figura 6 - Conceito Linear Fresnel



Fonte – Adaptado de IEA (2010)

Uma vez que os refletores Fresnel refletem a radiação da luz solar em um receptor estacionário linear, provocam a necessidade de um sistema para realizar o seguimento dos raios em um simples eixo, com o objetivo de manter esses espelhos focando radiação no tubo absorvedor (AYADI & ATARI, 2014 p. 03).

Para Garcia (2013), as principais vantagens do sistema linear Fresnel são o baixo custo dos espelhos planos comparados aos espelhos de canal parabólico e o fato de que o controle mais é simples e, por consequência, mais barato. Segundo o autor vários estudos enumeram outros benefícios, como por exemplo: no decorrer do dia o sistema linear Fresnel serve de proteção solar contra o sol abrasador de ambientes áridos, gerando sombra para reservatórios de água e para áreas de cultivo ou pastagem; durante a noite, com os espelhos na horizontal, oferece proteção contra temperaturas muito baixas.

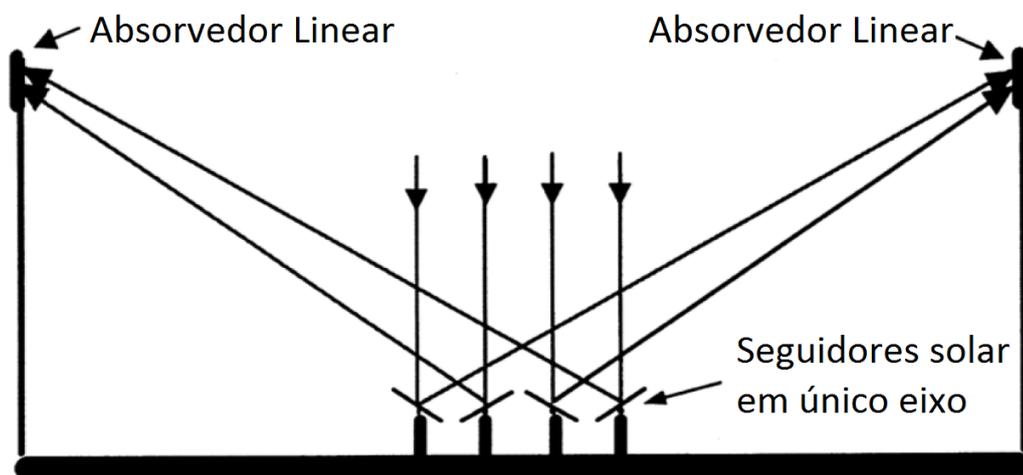
A principal desvantagem dos sistemas lineares Fresnel, segundo a Agência de Energia Internacional (IEA, 2010), é o fato de que esse sistema é menos eficiente que o sistema de calhas parabólicas na conversão de energia solar em energia elétrica e, também, é mais difícil de incorporar capacidade de armazenamento em seu design.

2.2.8 Fresnel Linear Compacto

Refletores linear Fresnel compactos (CFLR) se caracterizam por um design usado principalmente para processos industriais de aquecimento e resfriamento solar, que acontecem em aplicações com médias temperaturas (100°C - 250°C). Módulos CFLR podem, ainda, ser interconectados juntos dependendo dos requerimentos. Além disso, conexões série-paralelo podem ser feitas no intuito de alcançar taxa de fluxo de massa e temperatura demandada (AYADI & ATARI, 2014, p. 03).

Na Figura 7 é ilustrado o conceito de um sistema compacto linear Fresnel no qual é visível a ausência de sombras entre espelhos.

Figura 7 – Ilustração do conceito CLRF.



Fonte – Adaptado de (Mills & L. Morrison, 2000).

A diferença do sistema compacto para o convencional é que no compacto existem múltiplos absorvedores lineares potencializando a existência de mais fileiras de espelhos planos próximos entre si, orientados alternadamente para um determinado tubo absorvedor (GARCIA, 2013, p. 19).

2.2.9 Comparação Entre as Tecnologias de Concentração Solar

Todos os sistemas que foram citados possuem quatro características em comum: todos eles necessitam de um concentrador/refletor, de um receptor/absorvedor e de um fluido de trabalho que transporte e armazene o calor capturado.

A Tabela 1 caracteriza cada tipo, o que possibilita uma comparação.

Tabela 1 – Comparação Entre os Sistemas de Concentração

| | Fresnel Linear | Cilindro Parabólico | Disco Parabólico | Torre Solar |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------|
| Receptor | Fixo | Móvel | Móvel | Fixo |
| Foco de Concentração | Linear | Linear | Pontual | Pontual |
| Eficiência Ótica | * | ** | *** | ** |
| Temperatura de Operação (°C) | 270 | 390 | 750 | 565 |
| Rendimento Global | 8-10% | 10-16% | 25-30% | 20-35% |
| Espaço Ocupado | Médio | Grande | Pequeno | Médio |
| Eficiência líquida anual (%) | 12 | 11-16 | 12-25 | 7-20 |
| Funcionamento híbrido | Sim | Sim | Apenas em Alguns Casos | Sim |
| Margem de Evolução | Significativa | Limitada | Significativa | Muito Significativa |
| Custo por W instalado (€/W) | 3-4 | 4-6 | 9-11 | 4-6 |

Fonte – Adaptado de (IEA, 2010)

2.3 SEGUIDOR SOLAR

2.3.1 Horário solar aparente

De acordo com Cortez (2013), a determinação da posição do Sol é de máxima importância para qualquer sistema de segmento. Para isso, a determinação de alguns ângulos solares é necessária assim como a hora solar aparente.

Segundo Kalogirou (2009), para utilizar um método de rastreamento virtual é necessária a determinação da hora solar aparente (*Apparent solar Time – AST*), utilizada para expressar a hora do dia baseando-se no movimento angular aparente do sol. Segundo o autor é importante o cálculo da AST, pois não é comum coincidir a hora em que o sol cruza o meridiano do observador com as 12 horas do relógio, que utiliza a hora local padrão (*Local Standard Time – LST*). Finalmente, para

converter a LST em AST é necessário realizar a equação do tempo (ET) e a correção longitudinal.

Segundo Negreiros (2015), o planeta terrestre, em sua órbita ao redor do Sol, varia sua velocidade orbital ao longo do ano, fazendo com que o AST tenha uma pequena variação, o que causa inconstância na duração dos dias durante o ano. Esta variação é chamada de equação do tempo, uma função do dia do ano (N) que pode ser calculada da seguinte maneira:

$$ET = 9,87 \cdot \text{sen}(2B) - 7,53 \cdot \text{cos}(B) - 1,5 \cdot \text{sen}(B) \text{ [min]}$$

$$B = (N - 81) \frac{360}{364}$$

Onde ET representa a equação do tempo, B representa a correção longitudinal; N é o dia do ano em números corridos.

A correção longitudinal tem por objetivo ajustar o erro de longitude ocorrido dentro de um meridiano. A partir do fato que o Sol leva 4 minutos para percorrer 1 grau, o termo de correção longitudinal é:

$$4x (SL - LL)$$

Onde SL é a longitude padrão (*Standard Longitude*) da região (meridiano) e LL é a longitude local (*Local Longitude*). Considerando que o horário de verão (*daylight-saving* – DS) pode acrescentar ou não 60 minutos em certas épocas do ano, a hora solar aparente enfim pode ser representada como:

$$AST = LST + ET \pm 4 (SL - LL) - DS$$

Onde AST representa a hora solar aparente, LST é a hora local padrão, ET é a equação do tempo, SL é a longitude padrão, LL é a longitude local, DS é o horário de verão.

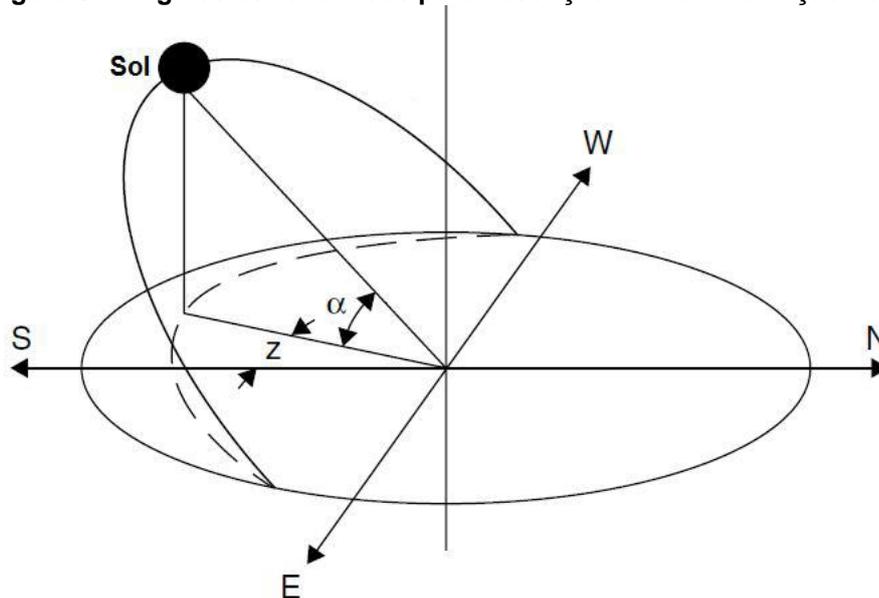
Assim, atribui-se o sinal negativo para regiões situadas a leste do meridiano de Greenwich, e o sinal positivo para regiões situadas a oeste.

2.3.2 Posição Solar

Segundo Kalogirou (2009), no entendimento de Ptolomeu, o sol possui dois graus de liberdade, assim com uso de apenas dois ângulos astronômicos, a altitude solar (α) e o azimute solar (z), pode-se descrever a posição solar para um observador na Terra. No entanto, deve-se definir o ângulo de declinação solar (δ) e o ângulo horário (h) com o objetivo de serem utilizados posteriormente.

Os ângulos de altitude solar e azimute solar estão representados na Figura 8 na intenção de serem melhor identificados.

Figura 8 – Ângulos astronômicos para descrição da movimentação do Sol.



Fonte – Adaptado de Kalogirou (2009).

A declinação solar (δ), de acordo com Falcão (2008), é o ângulo entre o plano da linha do equador e a reta definida pelo plano dos centros da Terra e do Sol, e este ângulo varia ao longo do ano. Segundo o autor a declinação solar varia entre $-23,45^\circ$ no solstício do inverno (21 de dezembro) e $+23,45^\circ$ no solstício de verão (21 de Junho). Sendo que a declinação solar é nula nos equinócios (21 de março, e 21 de setembro). Também, em cada dia, a declinação solar ($-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$) tem valor igual ao da latitude para a qual o sol está na vertical ao meio dia solar local.

Segundo Kalogirou (2009), a declinação solar é encontrada pela seguinte equação:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[\frac{360}{365} \cdot (284 + N) \right]$$

Onde N representa o dia do ano. Para fins de cálculos pode-se considerar constante a declinação solar durante o decorrer do dia. Por exemplo $N = 1$ para o dia 1 de Janeiro, e para dia 1 de março $N = 60$.

O ângulo horário (h) é definido, segundo Negreiros (2015), como sendo o ângulo medido sobre o equador, com extremidade no meridiano do sol e origem no meridiano local, assim, ao meio dia solar o ângulo horário é 0° . Este pode ser definido como:

$$h = 15 (AST - 12)$$

onde AST = hora solar aparente.

Segundo Falcão (2008), o ângulo de altitude solar (α) é formado pelos raios solares com o plano horizontal. Deste modo, assumindo L como sendo a latitude local expresso como o ângulo entre o plano equatorial e a linha do centro da terra ao ponto de interesse, é possível obter o ângulo de altitude como sendo:

$$\alpha = \arcsen (\sen (L) . \sen (\delta) + \cos (L) . \cos (h))$$

Portanto, pode-se determinar o ângulo azimutal, que segundo Soares Negreiros (2015) é aquele medido no sentido horário, com origem no norte ou sul geográfico e extremidade na projeção sobre o horizonte do raio solar, podendo ser expresso por:

$$z = \arcsen \left[\frac{\cos(\delta) . \sen(h)}{\cos(\alpha)} \right]$$

A equação está correta se $\cos (h) > \tan(\delta) . \tan (L)$. Caso contrário:

$$z = -\pi + \left[\arcsen \left(\frac{\cos(\delta) . \sen(h)}{\cos(\alpha)} \right) \right]$$

Relativo ao período da manhã, ou:

$$z = \pi - \left[\arcsen \left(\frac{\cos(\delta) . \sen(h)}{\cos(\alpha)} \right) \right]$$

em relação ao período após o meio dia.

Onde z representa o azimute solar, δ é a declinação solar, α é a altitude solar e h é o ângulo horário.

2.3.3 Seguidor Solar

Seguidor solar é um mecanismo construído com a finalidade de orientar um painel ou arranjo de painéis fotovoltaicos, concentradores de energia ou coletor solar, de maneira que estejam sempre voltados para o sol, para que haja uma maior incidência de raios solares perpendiculares à superfície dos equipamentos. Assim, com a maior incidência dos raios solares diretos, o rendimento do sistema aumenta (OLIVEIRA, 2008, p. 4).

2.3.4 Tipos de Seguidores Solar

Prinsloo & Dobson (2014) citam que existem basicamente três tipos de seguidores solares de um eixo disponíveis, estes são citados abaixo:

- Seguidor de um eixo horizontal (eixo de rastreamento é feito para permanecer paralelo a superfície da terra e permanece sempre orientado na direção Leste-Oeste ou Norte-Sul);
- Seguidor com eixo inclinado (eixo de rastreamento é inclinado do horizonte por um ângulo orientado na direção Norte-Sul);
- Seguidor de eixo vertical (o eixo de rastreamento é colinear ao eixo zênite). Também conhecido como seguidor solar de azimute.

Os autores Prinsloo & Dobson (2014) citam, também, que o seguimento solar pode ser feito de maneira mais complexa com sistemas de dois eixos, como por exemplo, Azimute-elevação, seguindo o sol nos planos horizontal e vertical. Esses tipos de sistemas requerem um estudo mais detalhado e um investimento elevado para a concepção do mecanismo seguidor.

No contexto de seguidores solar de um eixo, segundo Gea et al. (2010), um meio bastante acessível para realizar o seguimento solar em um único eixo se dá a partir de motores de passo e caixas redutoras de velocidade. Através deles pode-se

mover espelhos refletores de forma a seguir o movimento solar. A partir de um computador é feito o controle do movimento dos espelhos. O programa implementado na máquina utiliza equações que descrevem o movimento dos espelhos de acordo com o sol e enviam o comando para o motor. O controle é feito em malha aberta. A precisão do sistema não é descrita pelo autor. A Figura 9 demonstra alguns tipos de motor de passo.

Figura 9 – Motor de passo com caixa redutora de velocidade.



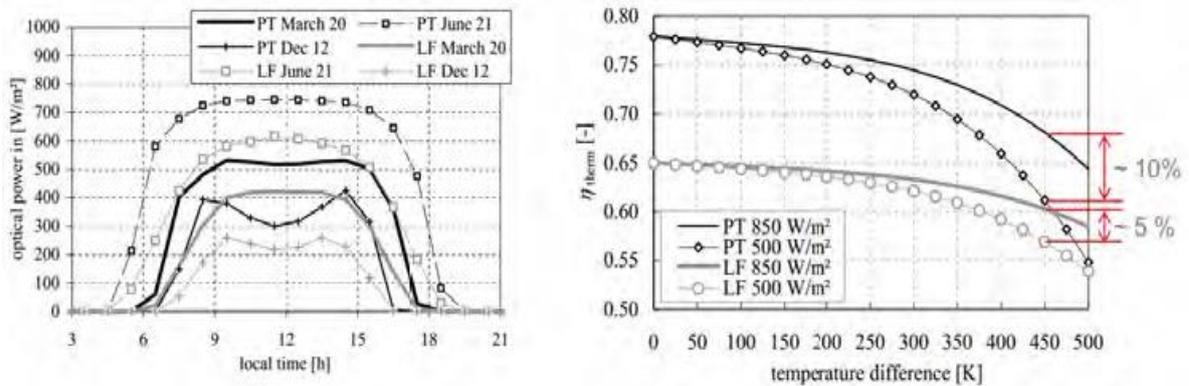
Fonte - Prinsloo & Dobson (2014)

2.3.5 Sistemas de Captação de Energia Solar Termal Lineares.

Dois principais tipos de refletores a partir de seguidores lineares são comumente utilizados na captação de energia solar térmica, quais sejam: canal/cilindro parabólico e linear Fresnel.

Feldhoff (2012), em seu trabalho, fez uma comparação entre tecnologias de sistemas Lineares Fresnel (LF) e cilindro parabólico (PT). Na Figura 10 pode-se observar a diferença na geração de energia diariamente e a eficiência em sistemas LF e PT nas diferentes estações do ano.

Figura 10 – Exemplo de diferenças da geração de energia diária (esquerda) e eficiência (direita) entre sistemas LF e PT nas diferentes estações do ano.



Fonte - Feldhoff (2012).

Quanto aos exemplos práticos relacionados a sistemas Fresnel Linear e cilindro parabólicos, Walker (2013) descreve o projeto e a construção em sistemas de baixo custo de concentradores Fresnel Linear para substituir fontes termais existentes na geração de energia e processos de aquecimento. Em seu trabalho está incluso um modelo de código e software para simular operacionalmente os aspectos do coletor solar.

Almeida (2013) desenvolveu um protótipo de refletor linear Fresnel. Em sua obra o autor chegou a demonstrar cálculos utilizados para encontrar ângulos de inclinação dos espelhos, porém, não foi implementado um sistema de seguimento autônomo.

Devido a busca incessante pelo o aumento de rendimento em sistemas solares, e tendo em vista a diversidade de métodos utilizados e já citados em literatura para a constituição de sistemas de seguimento solar, surge a possibilidade da utilização de um sensor do tipo LVDT para o auxílio no controle do movimento do refletor solar, de modo a obter uma maior eficiência na reflexão de raios solares até o absorvedor.

2.4 TRANSFORMADOR DIFERENCIAL LINEAR VARIÁVEL

De acordo com MEAS (2013), um LVDT (Transformador Diferencial Linear Variável) é um transdutor absoluto de posição/deslocamento que converte uma posição ou um deslocamento linear a partir de um referencial mecânico (zero ou posição nula) em um sinal elétrico proporcional. Esse sinal contém informação de fase (direção) e amplitude (distância).

2.4.1 Histórico do LVDT

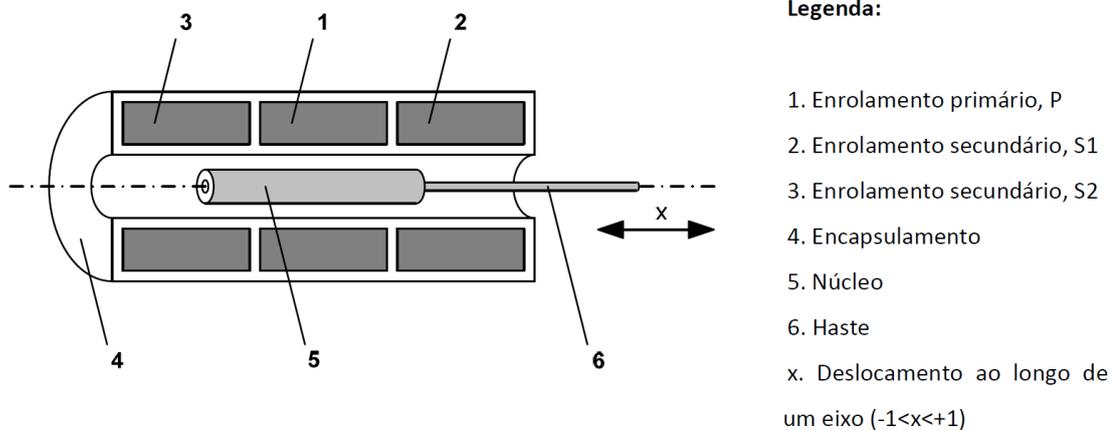
Segundo Szczyrbak & Schmidt (1997), nas primeiras décadas do século XX o transdutor diferencial linear variável (LVDT) começava a ser utilizado para a medição de deslocamento. Os primeiros sensores de medição LVDT criados começaram a ser utilizados no início do século passado, como um meio de controle de potência de corrente alternada de motores e geradores. Esses dispositivos pouco lembravam os atuais LVDTs.

De acordo com De Paula Veiga & Montanarin (2007), o transformador diferencial linear variável teve seu aperfeiçoamento acelerado principalmente na época histórica da Segunda Guerra Mundial. No contexto de guerra, o transformador passou a ser utilizado para descrever a posição nula em aviões, torpedos e sistemas bélicos de alta precisão. A tecnologia LVDT se tornou conhecida e distribuída mundialmente a partir do ano de 1946, por meio da publicação do artigo “The Linear Variable Differential Transformer” por Herman Schaevitz (volume IV, Número 2). Ao mesmo tempo se iniciou o uso dos transformadores diferenciais em processos telemétricos em equipamentos de análises químicas, transformando-se em dispositivos lineares. Segundo o autor, os sensores LVDTs passaram a ser utilizados rotineiramente no segmento da indústria e, a partir da década de 60, passaram a ser utilizados e desenvolvidos cada vez mais, de modo que hoje em dia existem diversas aplicações e utilizações para esse tipo de sensores de medição de precisão

2.4.2 Constituição do LVDT

Para Ferraz Dias (2015) os sensores LVDTs consistem, normalmente, em um dispositivo cilíndrico no qual estão alocados os enrolamentos da bobina principal e secundárias. Segundo o autor, as bobinas são dispostas de maneira a envolver o percurso retilíneo do núcleo móvel, conforme demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Constituição de um LVDT.

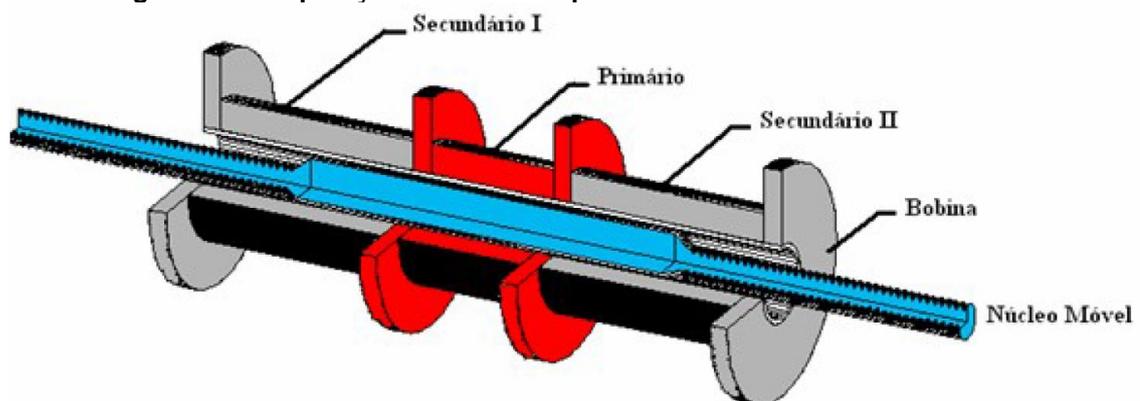


Fonte – Ferraz Dias (2015).

2.4.3 Bobinas que Constituem o Enrolamento

Segundo Schaevitz (1974) para a construção de um LVDT básico são necessárias três bobinas simetricamente espaçadas. De acordo com o autor, a bobina posicionada no centro é denominada de bobina primária do transformador e as bobinas adjacentes são denominadas de bobinas secundárias, consoante expõe a Figura 12. As bobinas que constituem o transformador possuem formato cilíndrico com a finalidade de facilitar o enrolamento das mesmas.

Figura 12 – Disposição das bobinas primária e secundárias de um LVDT.



Fonte - De Paula Veiga & Montanarin (2007).

Devido a determinadas características exigidas, o material para a confecção das bobinas deve ser selecionado de modo que o produto final satisfaça as solicitações necessárias. Desta forma, segundo De Paula Veiga & Montanarin (2007), as bobinas nas quais serão feitos os enrolamentos do LVDT deverão ser

confeccionadas a partir de material inerte que apresente as seguintes características:

- Não apresentar porosidade;
- Resistência térmica satisfatória;
- Apresentar resistência mecânica suficiente aos esforços solicitados;
- Baixo peso específico;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Vida útil elevada;
- Baixo custo de produção;
- Boa usinabilidade.

De acordo com Padilha (2000), a melhor escolha de material para usar nessa aplicação será de polímeros e de resinas termoplásticas, pois, segundo o autor, esse tipo de material agrega as características necessárias citadas acima e ainda apresenta vantagens no momento de sua aquisição, fabricação e descarte, pois possibilitam reciclagem mecânica e química.

O material escolhido para a fabricação do LVDT nesse estudo será o polipropileno (PP).

2.4.4. Polipropileno

Segundo a fabricante Isoloplast (2015), o polipropileno é uma resina termoplástica pertencente ao grupo das poliolefinas, que inclui os polietilenos e polibutenos com grandiosa faixa de propriedades e grande facilidade de processamento. O fabricante ainda cita que o consumo de polipropileno, devido a suas características, vem aumentando tal como a quantidade de aplicações no mercado mundial.

Algumas das principais características presentes no polipropileno, destacadas pelo fabricante, ISOLAPLAST (2015), são:

- A densidade do polipropileno é da ordem de $0,91 \text{ g/cm}^3$, uma das mais baixas entre todos os materiais plásticos disponíveis comercialmente. Isso permite obter peças com baixo peso;
- Apresenta elevada rigidez, além de boa resistência ao impacto e à temperatura ambiente;

- Excelente transparência por contato;
- Elevada resistência a fadiga por flexão, tornando-o adequado a aplicações em dobradiças integrais;
- Alta dureza superficial;
- Elevada resistência química, não sendo atacado pela grande maioria de produtos químicos à temperatura ambiente;
- Baixíssima absorção de água;
- Baixíssima condutividade elétrica.

As especificações técnicas do polipropileno podem ser encontradas na Tabela 02, de acordo com a fabricante Nitaplast (2015).

Tabela 02 – Propriedades do Polipropileno

| | | | |
|------------------|--|--------|---|
| FÍSICAS | Densidade (g/cm ³) | D53479 | 0,91 |
| | Calor específico (cal ^o /C*g) | D53417 | 0,46 |
| | Absorção de água (%) | D53715 | 0,03 |
| MECÂNICAS | Resistência à Tração (Mpa) | D53455 | 35 |
| | Alongamento na Ruptura (%) | D53457 | 10-20 |
| | Módulo de Elasticidade em Tração (Mpa) | D53455 | 1300 |
| | Módulo de Elasticidade em Flexão (Mpa) | D53455 | 1300 |
| | Resistência ao Impacto IZOD (J/m) | D256 | 55 |
| | Dureza Rockwell | D785 | R86 |
| | Coef. De Atrito de Deslize p = 0,05N/mm ² v = 0,6m/s Contra aço, temp. e retif. | - | 0,3 |
| | Ponto de Fusão (°C) | - | 160 |
| TÉRMICAS | Condutividade Térmica (W/m.K) | D52612 | 0,22 |
| | Expansão Térmica Linear (10 ⁻⁵ /K) | D52328 | 10 |
| | Temperatura de Uso Contínuo (°C) | - | -10 à 90 |
| | Relação de Inflamabilidade | UL 94 | HB |
| | Rigidez Dielétrica (KV/mm) | D53481 | > 40 |
| ELÉTRICAS | Constante Dielétrica até 1KHz | D53483 | 2,2-2,6 |
| | Fator de Dissipação até 1KHz | D53483 | 0,001 |
| | Resistividade Volumétrica (Ohm/cm A 22,8°C 50% RH (ohm/cm) | D53482 | 10 ¹⁵ |
| | Resistência a ácidos fracos | D543 | Excelente |
| QUÍMICAS | Resistência a ácidos fortes | D543 | Atacado |
| | Resistência a bases fracas | D543 | Excelente |
| | Resistência a bases fortes | D543 | Muito boa |
| | Resistência a solventes orgânicos | D543 | Resiste à vários solventes a temper. Menor que 80°C |

Fonte – Nitaplast (2015)

2.4.5 Núcleo do LVDT

Segundo Schaevitz (1974), o núcleo ferromagnético do LVDT é o componente móvel do sensor. O núcleo move-se linearmente dentro do transformador, o movimento gera um sinal que determina o tamanho do deslocamento. Segundo dados do autor é obrigatório que o núcleo possua características ferromagnéticas.

O melhor material será determinado de acordo com as características do ambiente ao qual o LVDT estará exposto. O LVDT será implementado em uma placa de captação de energia solar, ou seja, ficará exposto a situações de desgaste proporcionadas por mudanças climáticas. Assim, segundo De Paula Veiga & Montanarin (2007), os fatores que devem ser levados em consideração antes da escolha do material do núcleo ferromagnético são: temperatura de operação, possíveis efeitos de desmagnetização, intensidade do campo de indução, resistência a corrosão e coeficiente de temperatura.

De acordo com Padilha (2000), os materiais mais indicados para tal aplicação são: cerâmicas ferritas e ligas compostas de níquel e ferro. O material utilizado para o sensor LVDT nesse estudo será o ferrite.

2.4.6 Ferrite

Segundo Smith (1998), ferrites são materiais cerâmicos magnéticos que se obtêm misturando óxido de ferro (Fe_2O_3) com outros óxidos e carbonetos, na forma de pós. Os pós são, depois, prensados e sinterizados a altas temperaturas. As ferrites são divididas em ferrites duras e ferrites moles. Essa classificação se dá devido as suas propriedades magnéticas: as macias não permanecem magnetizadas significativamente, enquanto que a magnetização nas ferrites duras se considera permanente.

Para o autor, núcleos de ferrite são estruturas cerâmicas densas e homogêneas feitas por mistura de óxido de ferro (Fe_2O_3) com óxidos ou carbonetos de um ou mais metais, tais como manganês, zinco, níquel ou magnésio. Eles são pressionados, em seguida, sinterizados em um forno, e usinado conforme necessário para atender às diversas necessidades operacionais.

Os ferrites têm uma vantagem sobre outros tipos de materiais magnéticos, devido à alta resistividade elétrica e às baixas perdas por correntes de Foucault ao longo de uma ampla faixa de frequência. Essas características, juntamente com alta permeabilidade, tornam os ferrites ideais para utilização em aplicações tais como transformadores de alta frequência, os transformadores de banda larga, indutores ajustáveis e outros circuitos de alta frequência de 10 kHz a 50 MHz.

2.4.7 Haste Acoplada ao Eixo

A haste é o meio de transmissão do deslocamento do espelho de captação de energia solar até o núcleo. Esse material, segundo Schaevitz (1974), deve ser não-magnético para que não cause nenhuma influência magnética no interior dos enrolamentos.

Segundo a fabricante Trans-Tek (2012), os materiais preferidos para esse tipo de aplicação são aços inoxidáveis ou plásticos de engenharia. Segundo a fabricante, bons condutores como alumínio não podem ser utilizados, pois tem o potencial de gerar corrente de fuga o que causa interferência na resposta linear do LVDT. Por esse motivo, materiais como aço inox, série 303 e 304, são excelentes materiais para a haste do núcleo, pois além de não afetarem magneticamente, são muito resistentes a possíveis danos causados pelo meio.

Para a empresa, as hastes devem ser dimensionadas de modo que permitam o transdutor operar em sua extensão total. O uso de hastes menores do que o necessário pode diminuir a capacidade de alcance de medição do LVDT. Com o devido alinhamento da haste o núcleo não terá contato direto com a borda, o que acarreta um movimento livre de atrito, garantindo a não existência de desgaste por atrito.

2.4.8 Enrolamentos

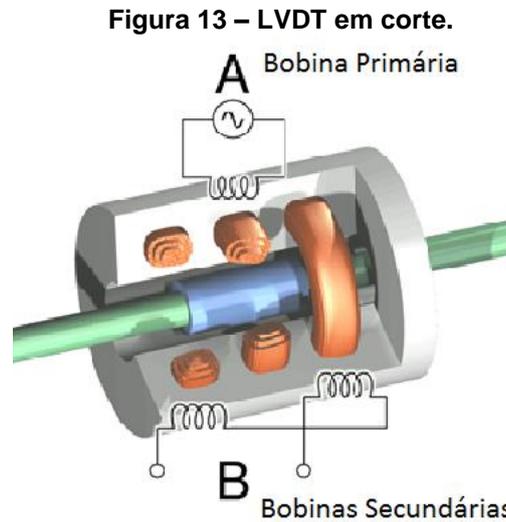
Os enrolamentos normalmente são produzidos com fios de cobre esmaltado, com bitola variando entre 26 AWG e 36 AWG. A quantidade de espiras por bobinas pode variar de acordo com o sistema condicionador, com a dimensão e com a precisão do LVDT. Deste modo, o número de voltas geralmente é avaliado empiricamente, a fim de determinar qual será o número exato de espiras de acordo com a bitola utilizada, para satisfazer a precisão exigida no movimento do seguidor solar (DE PAULA VEIGA & MONTANARIN, 2007, p. 17).

2.4.9 Princípio de Funcionamento do LVDT

De acordo com Wilson (2005), o Transformador Diferencial Linear Variável - LVDT - é baseado no princípio da indução magnética. Esse tipo de sensores tem

vido muito utilizado devido a sua alta resolução e a sua simplicidade e sua robustez. O autor destaca que os sensores LVDT possuem, também, alta linearidade, repetibilidade e precisão.

A Figura 13 demonstra uma vista em corte de um sensor LVDT.



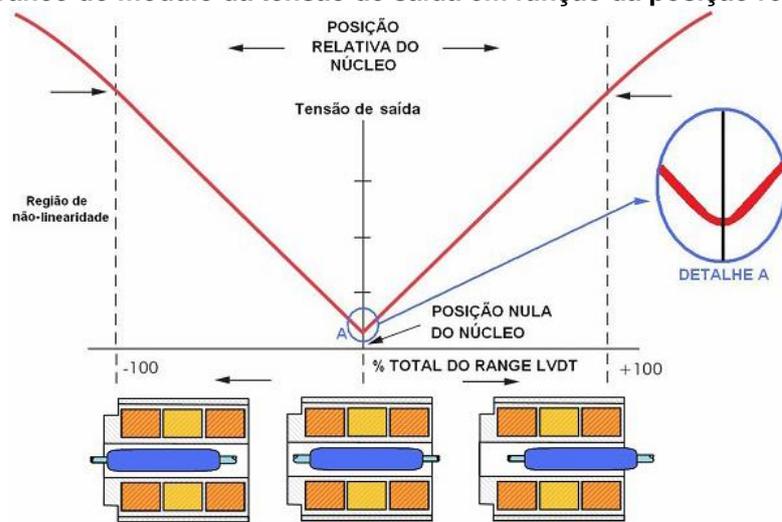
Fonte - Adaptado de Sensorwiki (2013).

A comunicação entre o núcleo e as bobinas do LVDT é alcançada por meio de acoplamento indutivo.

De acordo com De Paula Veiga & Montanarin (2007), um oscilador excita a bobina primária A enquanto as bobinas secundárias B são ligadas em série. De acordo com o movimento do núcleo, uma diferença de tensão é gerada na saída das bobinas secundárias. Se o núcleo está posicionado no centro, a diferença de tensão será nula (ponto nulo). Quando posicionado em um dos lados das bobinas secundárias, haverá uma tensão condicionada de modo a medir o deslocamento linear do núcleo.

De acordo com o autor e conforme a Figura 14, pode-se observar as posições do núcleo com um gráfico que reproduz as tensões de saída (V_o) de acordo com a posição.

Figura 14 – Gráfico do módulo da tensão de saída em função da posição relativa do núcleo.



Fonte - De Paula Veiga & Montanarin (2007)

Com uma das bobinas secundárias enroladas em direção oposta das outras duas bobinas indutoras irá gerar um sinal de saída em fase oposta. Uma tensão diferente indicará a direção do deslocamento. A fase do secundário indica se o núcleo está acima ou abaixo da posição central, enquanto que a amplitude indica quanto longe o núcleo está deslocado da posição central.

A fórmula básica demonstra que a tensão é proporcional ao número de enrolamentos das bobinas do LVDT. A fórmula é:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_{out}}{N_{in}}$$

onde

V_{out} representa a tensão de saída;

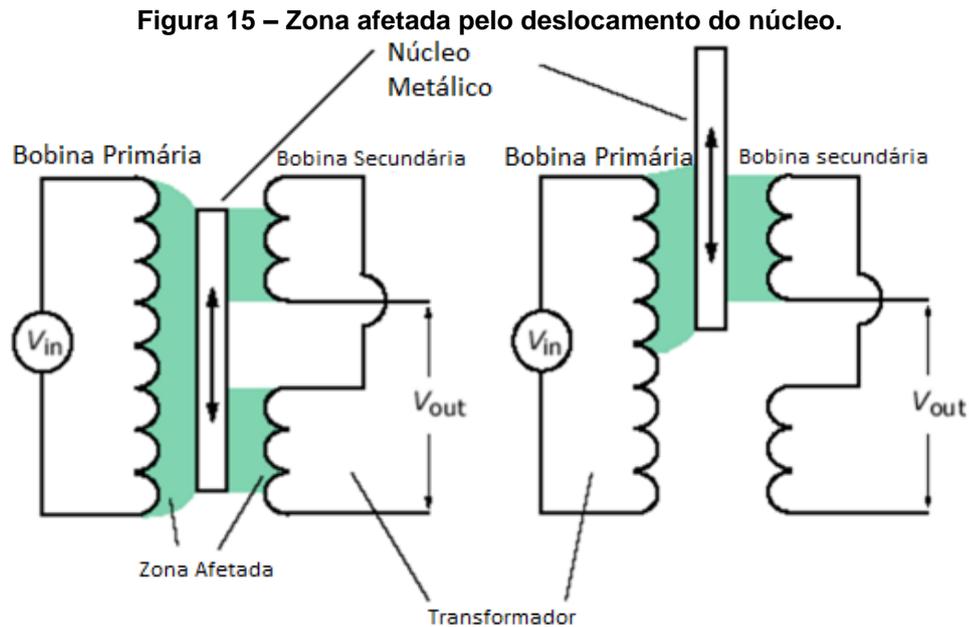
V_{in} é a tensão de entrada;

N_{out} é o número de enrolamentos da bobina secundária;

N_{in} é o número de enrolamentos da bobina primária;

Quando o núcleo ferromagnético desliza através do transformador, um certo número de enrolamentos das bobinas é afetado pela proximidade do deslizamento do núcleo e, assim, gera uma única tensão de saída.

A Figura 15 representa a zona afetada pelo deslocamento do núcleo.



Fonte – Adaptado de EFUNDA (2012).

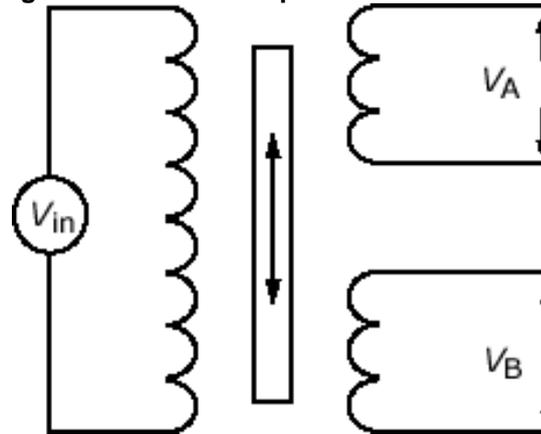
A maioria dos sensores LVDT são dispostos como demonstrado na Figura a 15. Este tipo de arranjo é conhecido como *open wiring*. Uma vez que o número de enrolamento das bobinas é distribuído uniformemente ao longo do transformador, a tensão na saída será proporcional ao deslocamento do núcleo quando o núcleo desliza através do transformador. A equação é, (EFUNDA, 2012)

$$D = M \times V_{out}$$

onde D é o deslocamento do núcleo ferromagnético e M é a sensibilidade do transformador (inclinação de deslocamento – curva tensão).

Outro tipo de LVDT, normalmente utilizado, é conhecido como *ratio metric wiring* (EFUNDA, 2012), como demonstrado na Figura 16.

Figura 16 – LVDT do tipo *Ratiometric Wiring*.



Fonte – EFUNDA (2012).

O deslocamento para este tipo de LVDT é dado pela seguinte relação:

$$D = M \times \frac{V_A - V_B}{V_A + V_B}$$

onde

D representa o deslocamento do núcleo; M representa a sensibilidade do transformador a partir do ponto nulo; V_{in} representa a tensão de entrada na bobina primária; V_A representa a tensão de saída na bobina secundária A e V_B representa a tensão de saída na bobina secundária B.

2.4.10 Principais Características de um LVDT

Algumas das principais características de um Transformador Diferencial Linear Variável, que o creditam como um dos melhores sensores de deslocamento segundo a fabricante MEAS (2013), são as citadas abaixo juntamente com a justificativa para cada uma delas.

Vida mecânica infinita – A inexistência de atrito ou contato entre a parte estática (bobinas) e a parte móvel (núcleo) de um LVDT significa que não existe nada que possa se desgastar. Isso proporciona ao LVDT, essencialmente, uma vida mecânica infinita. Isso é um requerimento supremo em aplicações como teste de fadiga em materiais e estruturas. A vida mecânica infinita também é vital em mecanismos e sistemas que exigem alta confiabilidade encontrados em aviões, mísseis, naves espaciais e equipamentos em sistemas industriais críticos.

Resolução Infinita – A operação sem atrito, combinada com o princípio de indução por qual o LVDT funciona, confere ao LVDT duas excepcionais características. A primeira é verdadeira resolução infinita. Isso significa que o LVDT pode responder mesmo a um minúsculo movimento do núcleo e produzir um sinal de saída. A legibilidade da eletrônica externa representa a única limitação em resolução.

Repetibilidade de Posição Nula – A simetria inerente da construção de um LVDT proporciona sua segunda excepcional característica: Repetibilidade de posição (zero) nula. A posição nula em um LVDT é extremamente estável e repetível. Assim, o LVDT pode ser usado como um excelente indicador de posição nula em sistemas de controles.

Separação entre bobina e núcleo – A separação entre as bobinas e o núcleo permitem a isolação de meios como pressurizados, corrosivos, ou fluídos ácidos dos carretéis das bobinas, através da inserção de um material não magnético entre o núcleo e a parte interna do carretel onde as bobinas estão alocadas. Deste modo, se dá um completo selamento do núcleo e bobinas, tornando o LVDT aplicável em meios agressivos.

Alta robusteza – A combinação de matérias utilizados em LVDTs e as técnicas de montagem usadas na sua construção podem resultar em sensores robustos e de alta durabilidade. A construção robusta permite o funcionamento mesmo após a exposição a cargas de impacto e alto nível de vibração frequentemente encontrados em meios industriais.

Compatibilidade de ambientes – Um LVDT é um dos poucos sensores que podem operar em uma variedade de ambientes hostis. Por exemplo, um LVDT pode ser selado hermeticamente utilizando aço inoxidável que proporciona sua exposição a um ambiente corrosivo. Em certas situações, os LVDTs podem operar em temperaturas criogênicas, por exemplo, em contato com nitrogênio líquido. Existem LVDTs compatíveis e que podem ser utilizados na combinação de diversos ambientes hostis. No entanto, sua vida de funcionamento pode ser limitada devido a alta exposição. Isso deve ser considerado de acordo com a aplicação.

Isolação entre INPUT/OUTPUT – O fato de que o LVDT é um transformador significa que existe completa isolação física entre a excitação de entrada (bobina principal) e de saída (bobinas secundárias). Isso proporciona, também, a isolação

galvânica entre o sinal e o ponto de excitação para alta qualidade em medições e controle de loops.

Devido a essas características acredita-se que o sensor LVDT possa desempenhar muito bem sua função na medição de precisão do seguidor solar.

2.5 METROLOGIA

2.5.1 Conceito de Metrologia

Segundo o INMETRO (2000), metrologia é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza, em qualquer campo da ciência ou tecnologia. Portanto, segundo o Instituto Nacional de Metrologia, a metrologia científica e industrial é de suma importância para o desenvolvimento e para a inovação tecnológica, o que proporciona a competitividade e cria um ambiente favorável ao desenvolvimento industrial e científico em todos lugares, independentemente da região ou país.

Segundo o CICMAC (2000), metrologia é uma ferramenta imprescindível para:

- Qualidade inovação e competitividade;
- Garantia de justas relações de troca (relações comerciais);
- Promover a cidadania (saúde, segurança e meio ambiente);
- Avaliar a conformidade de produtos e processos;
- Assegurar conhecimento nacional e internacional.

Desta maneira, o Centro Integrado de Capacitação em Metrologia e Avaliação da Conformidade (CICMAC) resumidamente divide a metrologia em três grandes áreas, as quais são dispostas a seguir juntamente com as definições do autor:

Metrologia Científica: visa o alcance de altos níveis de qualidade metrológica por meio de instrumentos laboratoriais e de pesquisas e metodologias científicas baseadas em padrões de medições nacionais e internacionais.

Metrologia Industrial: utiliza sistemas de medição para controlar os processos produtivos industriais, sendo responsável pela garantia de qualidade dos produtos acabados.

Metrologia Legal: relacionada aos sistemas de medições usados nas áreas de segurança, saúde e meio ambiente.

Portanto, segundo o INMETRO (2000) ,pode-se caracterizar como objetivos da metrologia:

- Garantir que especificações técnicas, regulamentos e normas existentes, proporcionem as mesmas condições de perfeita aceitabilidade na montagem e encaixe de partes de produtos finais, independente de onde sejam produzidas;
- Traduzir a confiabilidade nos sistemas de medição;
- Melhoria no nível de vida das populações.

2.5.2 Sistema de Medição

Um sistema de medição caracteriza-se no meio pelo qual as medições serão efetuadas. É construído de maneira que permita a comparação do mensurando com a unidade de medição e indique o número de vezes somadas a fração de unidade de medição que está contida dentro do mensurando.

O termo sistema de medição descreve, da melhor maneira possível, qualquer meio de medição, desde os meios de medição mais simples até aqueles compostos por vários módulos interligados, como as máquinas de medir por coordenadas.

2.5.3 Módulos Básicos de um Sistema de Medição

Segundo Albertazzi & Sousa (2008), a grande maioria dos sistemas de medição que operam pelo princípio da indicação apresentam três módulos funcionais bem definidos. Esses módulos são citados abaixo:

- O transdutor ou sensor;
- A unidade de tratamento do sinal; e
- O dispositivo mostrador ou registrador.

A Figura 17 esquematiza os módulos funcionais de um sistema de medição.

Figura 17 – Módulos funcionais de um sistema de medição que opera pelo método da indicação.



Fonte - Adaptado de Albertazzi & Sousa (2008)

2.5.4 Transdutor

Um transdutor, para Albertazzi & Sousa (2008), é “o módulo do sistema de medição que gera um sinal de medição geralmente proporcional ao valor do mensurando.” Esse sinal, segundo os autores, pode ser mecânico, pneumático, elétrico ou de outra natureza, normalmente o sinal é linear. Resumidamente, o transdutor transforma um efeito físico em outro mais conveniente para poder ser medido.

2.5.5 Unidade de Tratamento de Sinais

Segundo Ribeiro (2004), a saída (sinal) do elemento sensor geralmente não é o suficiente para operar diretamente um indicador, um registrador ou um controlador. Assim, é necessário a adição de um outro elemento para processar o sinal de saída do sensor em outro sinal mais adequado em forma e amplitude.

A unidade de tratamento do sinal processa o sinal de medição do transdutor e usualmente amplifica sua potência. A função da unidade de tratamento do sinal é tornar esse sinal amplificado para sua posterior interpretação (Albertazzi & Sousa, 2008, p. 100).

2.5.6 Dispositivo Mostrador

O dispositivo mostrador é o último módulo de um sistema de medição. Segundo Ribeiro (2004), esse dispositivo é o instrumento de medição que mostra o valor instantâneo da variável no seu display. Esse display pode ser analógico ou digital.

2.5.7 Qualidade de Medição

Em metrologia, segundo Lima Junior (2012), a ciência da medição, o conceito de exatidão (ou acuidade) refere-se ao grau de concordância de uma medida com seu valor alvo. Ou seja, quanto mais próxima do valor verdadeiro correspondente, mais exata é a medida.

Já o conceito de precisão, para Ribeiro (2004), é o grau de concordância mútua e consistente para que entre várias medições individuais haja uma repetitividade e reprodutibilidade de medidas. Ainda segundo o autor, a precisão é a qualidade que caracteriza um instrumento de medição de dar indicações equivalentes ao valor verdadeiro da quantidade medida.

2.5.8 Ensaio de calibração

Segundo a norma da ABNT ISO/IEC 15025 (2005), intitulada Requisitos Gerais Para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração , diversos fatores determinam a correção e a confiabilidade dos ensaios e/ou calibrações realizados em laboratórios. Esses fatores incluem contribuições de:

- Fatores humanos;
- Acomodações e condições ambientais;
- Métodos de ensaio e calibração e validação de métodos;
- Equipamentos;
- Rastreabilidade da medição;
- Amostragem;
- Manuseio de itens de ensaio e calibração.

Assim segundo a norma os resultados de cada ensaio, calibração, ou séries de ensaios ou calibrações devem ser relatados com exatidão, clareza, objetividade, sem ambiguidade e de acordo com quaisquer instruções específicas nos métodos de ensaio ou calibração, evitando ao máximo as influências dos fatores listados acima.

3. METODOLOGIA

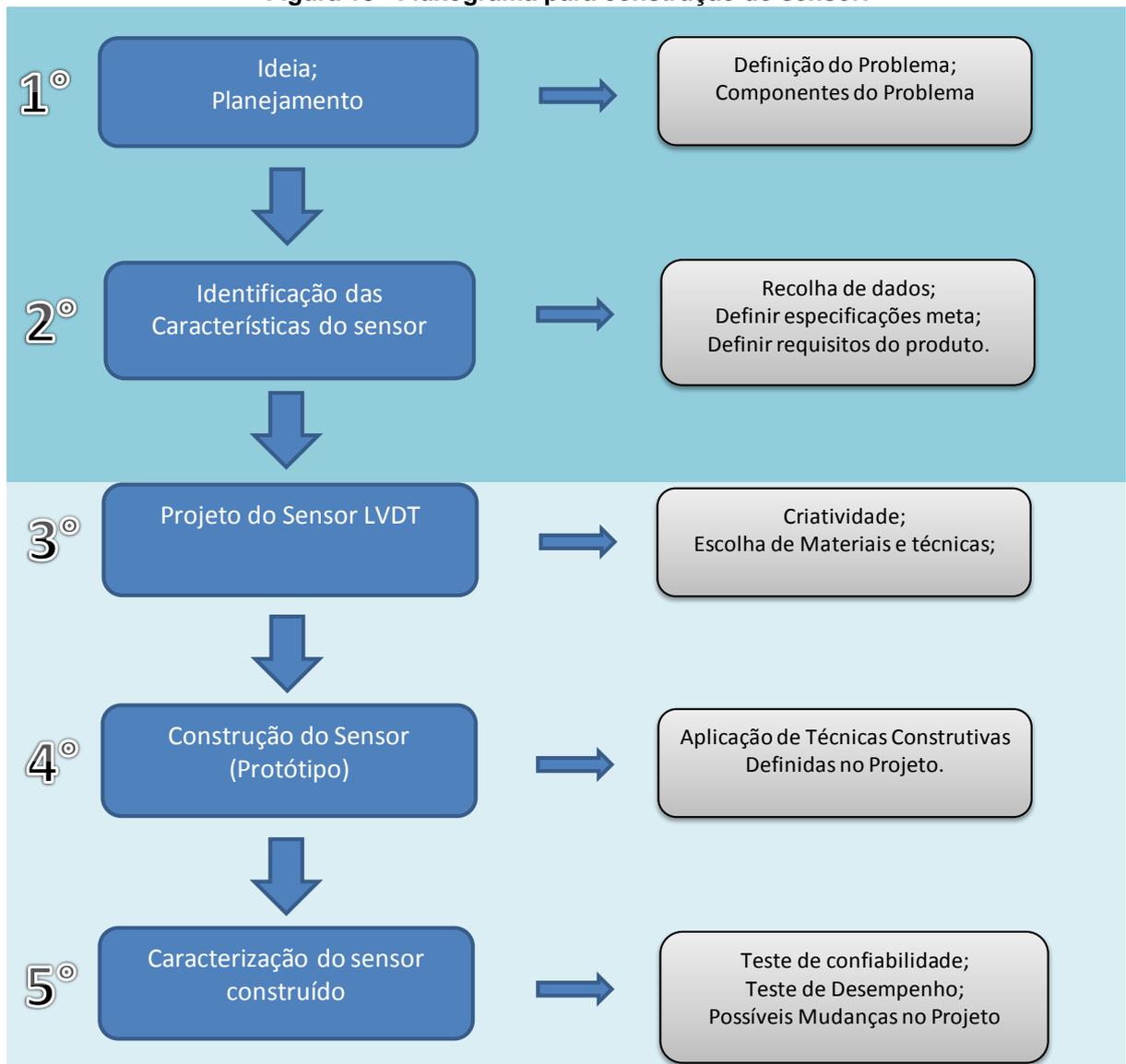
Nesse capítulo é demonstrada a metodologia usada para a construção do sensor LVDT. Também são demonstradas as etapas detalhadas do processo. Quanto a metodologia, o trabalho em mãos faz a opção por um método convencional com caráter científico e resultados obtidos empiricamente para a construção de um sensor de deslocamento linear para aplicação em um seguidor solar.

Quanto ao procedimento, esse trabalho foi realizado por meio da fabricação direta do sensor através de usinagem e montagem dos componentes. A caracterização do sensor foi feita em laboratório com o auxílio de um gerador de função, um sensor do tipo potenciômetro linear e um osciloscópio. Essas ferramentas permitiram a definição final de qual foi a relação entre as bobinas secundárias, e primária e o número ideal de espiras de cada bobina. Após, foi definida forma final do sensor de acordo com o melhor resultado obtido.

Os resultados dos testes, bem como as respectivas análises são organizados em um relatório de pesquisa, que contém uma comparação de dados em cada configuração testada do sensor, comprovando o motivo da escolha da configuração final.

O fluxograma apresentado na Figura 18 demonstra as etapas de construção do protótipo em azul e a descrição das fases de construção em cinza.

Figura 18 - Fluxograma para construção do sensor.



Fonte – Autoria própria.

3.1 Identificação das características do LVDT

Para a construção do sensor foi necessário uma revisão de literatura sobre o assunto. Deste modo, foi realizado um estudo bibliográfico com diversos meios de pesquisas. Cinco áreas distintas foram consideradas indispensáveis para o projeto do sensor de deslocamento linear para aplicação no seguidor solar. Assim, a revisão bibliográfica está disposta da seguinte maneira respectivamente: Energia Solar, Concentração Solar, Seguidor Solar, Sensor LVDT e Metrologia.

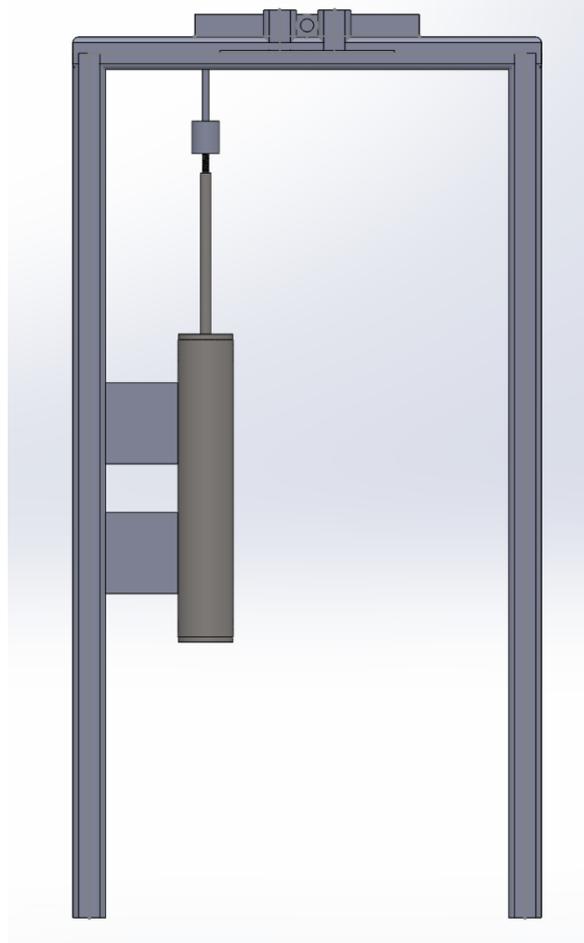
Deste modo, as principais características requisitadas para a construção do sensor podem ser encontradas a partir da revisão de literatura realizada.

3.2 Projeto do LVDT

O projeto do transdutor foi elaborado de maneira a se obter um protótipo com robusteza e tamanho desejado a partir de materiais acessíveis e que proporcionem ao sensor as características necessárias.

Para a escolha dos materiais, um dos fatores levado em consideração é o local aonde o sensor irá operar. O sensor irá ser alocado na posição vertical, fixado a estrutura aonde a placa solar está alocada. O acoplamento da haste do sensor a placa será realizado de maneira direta, com auxílio de um acoplamento que possibilite a transmissão do movimento angular para linear. Desta maneira, o sensor não sofrerá forças externas relevantes, visto que ele irá somente auxiliar no comando da placa solar que está travada pelo motor de passo, eliminando assim a necessidade do cálculo de esforços sofridos. A Figura 19 representa como o sensor será posicionado na placa solar.

Figura 19 – Acoplamento do sensor no sistema de captação solar.



Fonte – Autoria própria.

Também em relação a escolha dos materiais, foi levado em consideração a facilidade de aquisição, de acordo com a disponibilidade do mercado, as características mecânicas dos materiais de acordo com o processo construtivo e os requisitos do sensor. Com base nisso, os materiais escolhidos no projeto para a construção foram os seguintes:

Tabela 03 - Materiais utilizados em cada componente do sensor LVDT.

| Componente | Materiais |
|---------------------|------------------------------|
| Haste | Alumínio 3003 / Inox 304 |
| Carretel | Polipropileno |
| Núcleo | Ferrite |
| Bobinas | Fio de cobre esmaltado 27awg |
| Invólucro do núcleo | Nylon |
| Capsula de proteção | Inox 304 |

Fonte – Autoria própria.

De modo a auxiliar na construção do protótipo, foi realizado o desenho de cada componente do sensor com auxílio do software Solidworks e, finalmente, uma montagem em 3D com a vista final do sensor.

A Figura 20 representa o modelo final do sensor LVDT após a montagem, sem a carcaça final.

Figura 20 – Desenho 3D. Concepção do sensor sem carcaça.

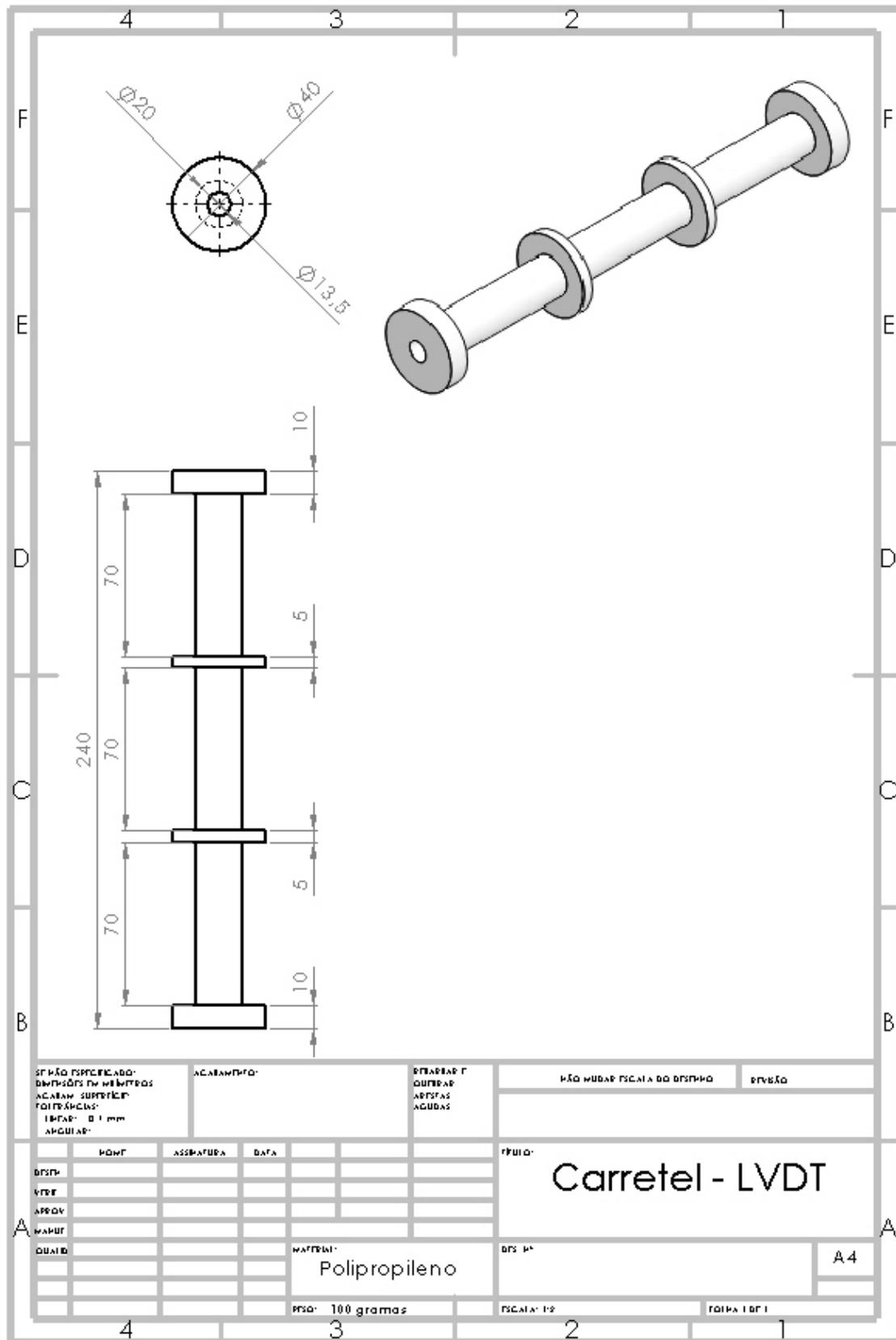


Fonte – Autoria própria.

3.3 Construção do Sensor

Para a construção do carretel para alocação das bobinas foi utilizado o polipropileno como material. A peça em questão foi projetada para que o sensor obtivesse um curso de no mínimo 70 mm. Assim foi realizado o desenho 3D do carretel e posteriormente plotadas suas vistas. O seguinte desenho, Figura 21, foi utilizado para auxílio na fabricação do carretel:

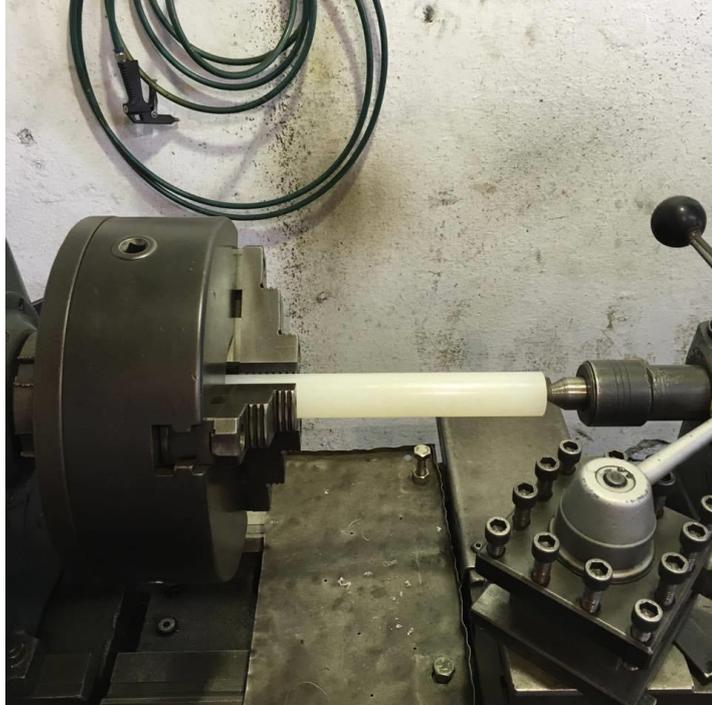
Figura 21 – Desenho do carretel.



Fonte – Autoria própria.

A construção foi realizada a partir da usinagem, em um torno da marca IMOR, de um tarugo maciço cilíndrico, com diâmetro de 40mm x 400 mm de comprimento, conforme demonstrado na Figura 22.

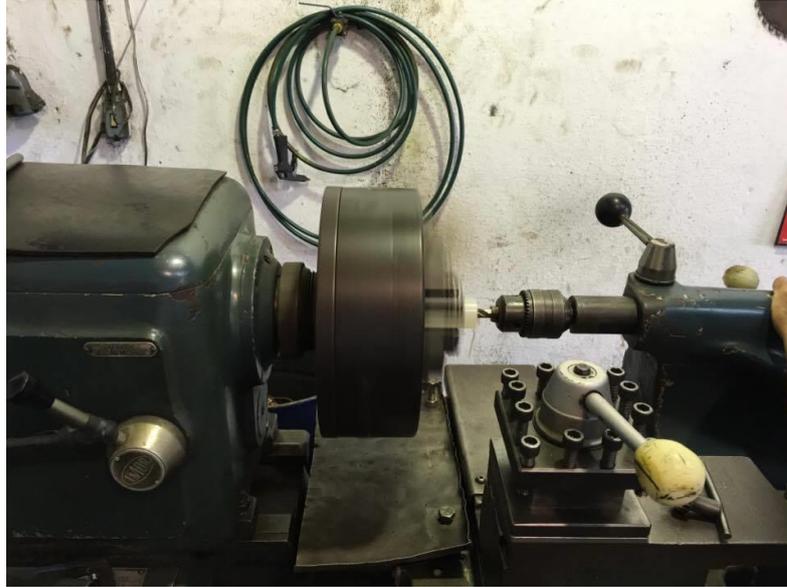
Figura 22 – Usinagem a partir de um tarugo maciço de polipropileno



Fonte – Autoria própria.

Primeiramente realizou-se a perfuração do tarugo maciço com uma broca de aço rápido, com diâmetro de 13,5 mm com retirada frequente da broca do furo para eliminação do cavaco. A velocidade e o avanço utilizados foram 2000 rpm e 0,3 mm/rotação respectivamente. A Figura 23 demonstra a perfuração do tarugo.

Figura 23 – Etapa de perfuração durante a usinagem do carretel.



Fonte – Autoria própria.

Devido a baixa condutividade térmica dos plásticos, e para evitar um aquecimento demasiado do material, os parâmetros de usinagem foram ajustados de acordo com as características do polipropileno. Dessa forma, para se obter um melhor acabamento na usinagem longitudinal foi utilizado uma ferramenta de aço rápido com ângulo de corte negativo, tendo geometria arredondada na ponta para o desbaste. Os seguintes parâmetros de usinagem foram utilizados.

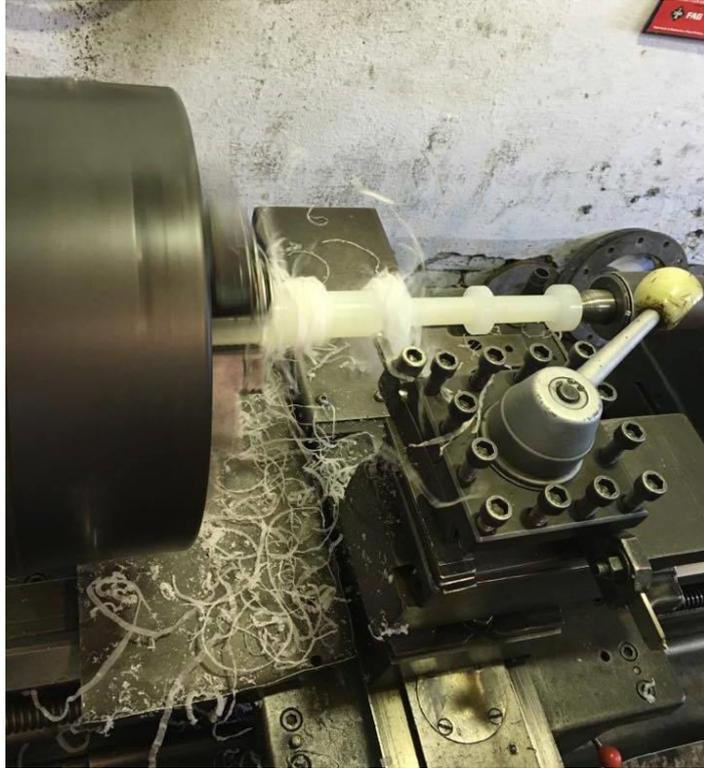
Tabela 04 – Parâmetros de usinagem para o carretel

| Velocidade | Avanços | | Profundidade de corte |
|-------------------|----------------|----------------|------------------------------|
| 200 m/min | Desbaste | 0,5 mm/rotação | 1 mm |
| | Acabamento | 0,1 mm/rotação | |

Fonte – Autoria própria.

Durante a usinagem a formação do cavaco deu-se com um formato de fita contínua, sendo esse comumente encontrado em usinagem de plásticos, comprovando assim que os parâmetros de usinagem utilizados foram adequados a aplicação. A Figura 24, representa a formação do cavaco.

Figura 24 – Formação de cavaco durante a usinagem do carretel



Fonte – Autoria própria.

A precisão final utilizada e aferida foi de 0,05 mm, no diâmetro, e de 0,02 mm no comprimento das bobinas.

No enrolamento das bobinas condicionadoras foi utilizada uma máquina de rebobinagem de motores elétricos, operada manualmente e que possui um marcador de voltas, para realizar o controle do número de espiras de cada bobina. A Figura 25 representa o equipamento utilizado para tal.

Figura 25 – Equipamento manual utilizado para enrolamento das bobinas.



Fonte – Autoria própria.

O material utilizado para a confecção das bobinas foi fio de cobre esmaltado, com resistência a temperatura de 180 °C, com bitola de 27 awg, ou 0,361 mm de diâmetro. A razão da escolha da bitola do fio deve-se ao fato de que o fio 27 awg possui uma boa resistência a tração e, ao mesmo tempo, uma secção transversal pequena, permitindo uma grande quantidade de enrolamentos. A definição do número de espiras de cada bobina será tratada posteriormente, pois foi definida a partir dos testes.

A princípio, as três bobinas foram enroladas com o mesmo número de voltas. Para o início dos testes foi utilizada uma proporção de 1:1 no número de espiras entre a bobina primária e as secundárias. Sendo assim, o primeiro enrolamento foi realizado com 1100 espiras nas três bobinas.

Para a construção do núcleo foi utilizado como material o ferrite. Devido a dificuldade para aquisição desse material no mercado nacional e com as dimensões desejadas, foram adquiridas peças em menor dimensão e realizada a junção. Assim, foram utilizados ferrites com formato cilíndrico achatado paralelamente nas laterais, tendo em vista que foram os materiais únicos encontrados no mercado com custo e disponibilidade imediata. Devido ao fatos detalhados, as dimensões do ferrite utilizado foi de 8 mm de diâmetro x 69 mm de comprimento.

A Figura 26 representa a geometria do ferrite utilizado.

Figura 26 – Ferrite.



Fonte – Autoria própria.

Em um LVDT o núcleo deve possuir comprimento igual ao comprimento da soma de uma bobina secundária e uma primária. Assim, devido a existência de uma parede divisória de 5 mm entre a bobina primária e secundária e a necessidade de o posicionamento final ser preciso, foi construída uma bucha em formato de canudo para alocar os ferrites e atingir a dimensão desejada do núcleo.

A confecção da bucha foi feita a partir da usinagem em um torno mecânico da marca Nardini. O material utilizado para a confecção do invólucro do núcleo foi o nylon. Pelo fato do nylon e do polipropileno serem materiais com características mecânicas muito parecidas, as mesmas ferramentas e os mesmos parâmetros de usinagem utilizados na fabricação do carretel foram utilizadas.

A Figura 27 demonstra o desenho do invólucro do núcleo.

Para obtenção do invólucro do núcleo foi usinado um tarugo de nylon com diâmetro de 20 mm x 200 mm de comprimento. A tolerância utilizada foi de 0,5 mm no diâmetro e 0,2 mm no comprimento. A cavaco apresentado durante a usinagem foi o de fita contínua.

A Figura 28 demonstra a usinagem.

Figura 28 – Usinagem da bucha para alocar o núcleo de ferrite.



Fonte – Autoria própria.

Após o desbaste, para atingir o diâmetro desejado de 13,4 mm, foi realizada a perfuração. A rotação utilizada foi de 2000 rpm e o avanço de 0,3 mm/rot. Também foi utilizado líquido refrigerante para evitar aquecimento na peça, no intuito de não ocasionar perda de precisão dimensional.

A Figura 29 demonstra a perfuração da peça.

Figura 29 – Perfuração do invólucro do núcleo.



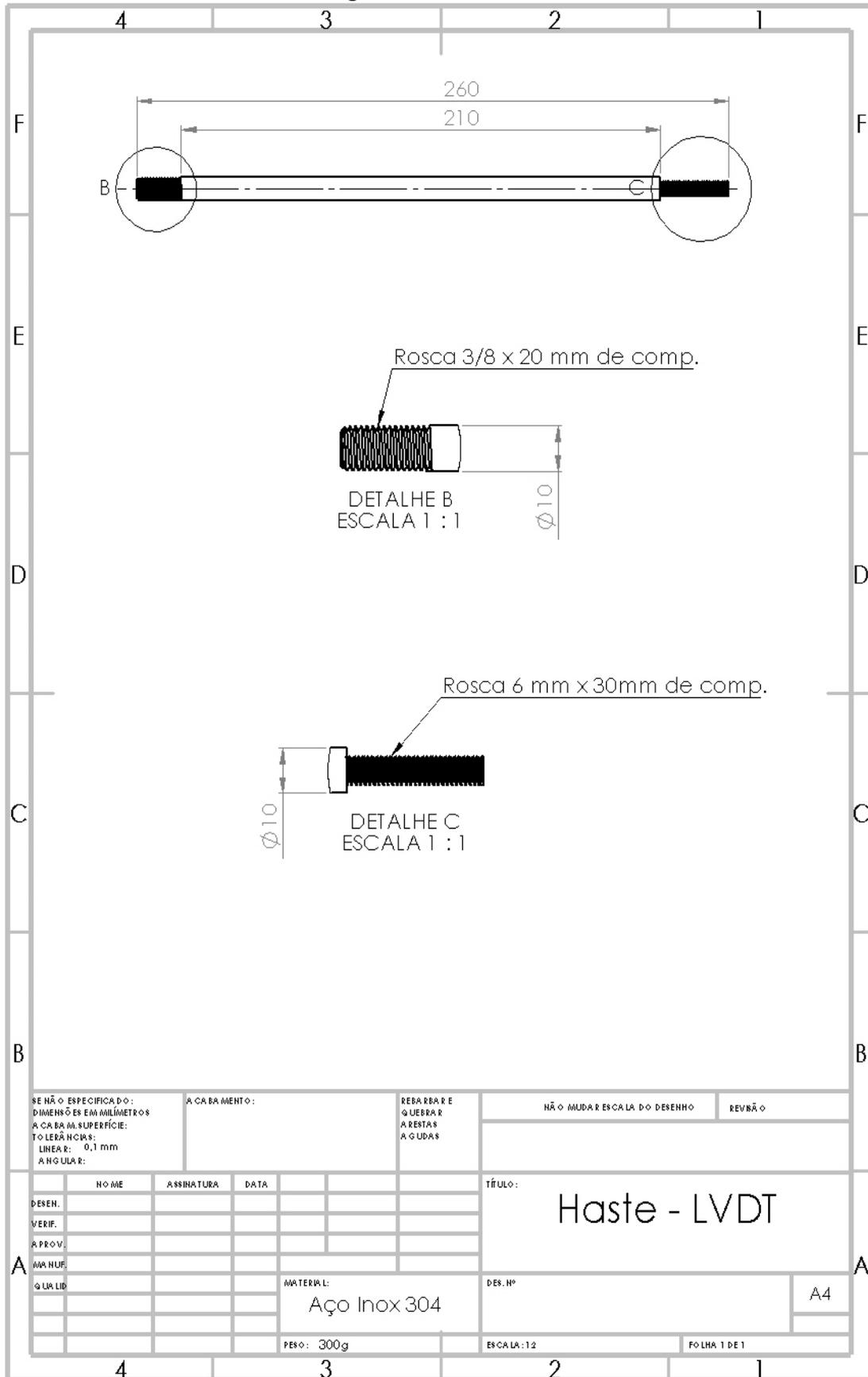
Fonte – Autoria própria.

Após a perfuração foi confeccionada uma rosca em uma das extremidades da bucha, para o acoplamento entre a haste e o núcleo. A rosca feita foi padrão DIN 3/8 x 16 fios por polegada tendo 10 mm de profundidade, assim, o acoplamento com a haste serve também para travar os ferrites internamente.

Foram fabricadas duas hastes de maneira a serem comparados os resultados entre as duas. Primeiramente construiu-se uma haste de alumínio e, posteriormente, uma haste de aço inoxidável série 304. Foi realizado, ainda, um desenho em 3D para auxílio na fabricação da peça.

A Figura 30 representa o desenho utilizado para construção da haste de inox 304.

Figura 30 – Desenho da haste.



Fonte – Autoria própria.

Pelo fato de a usinabilidade dos aços inoxidáveis serem mais baixa em relação ao alumínio e ao nylon, devido a sua ductilidade e, também, pela sua elevada capacidade de encruar muito rapidamente, os parâmetros de usinagem e ferramentas utilizadas foram diferentes dos utilizados anteriormente. A ferramenta utilizada foi um inserto da marca Sandvik, série 2000 de metal duro, com raio de 0,4 mm. A velocidade utilizada para o desbaste foi de 300 m/min com avanço de 0,2 mm/rot. A profundidade (A_p) usada foi de 0,5 mm.

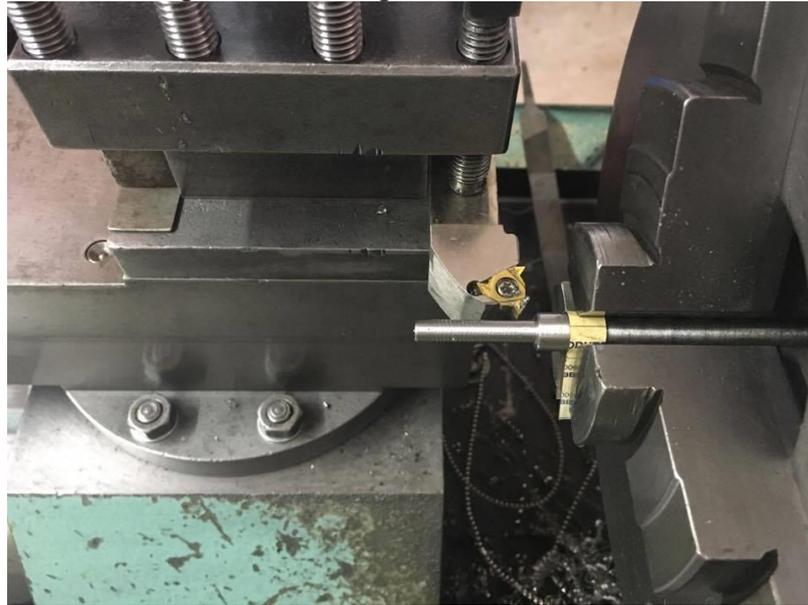
Após o desbaste foram usinadas as roscas com padrão DIN nas dimensões especificadas em desenho, com ferramenta própria para tal. As Figuras 31 e 32 representam a usinagem de desbaste e a fabricação de rosca respectivamente na haste de aço inox ABNT 304.

Figura 31 – Desbaste da haste.



Fonte – Autoria própria.

Figura 32 – Usinagem de rosca na haste.



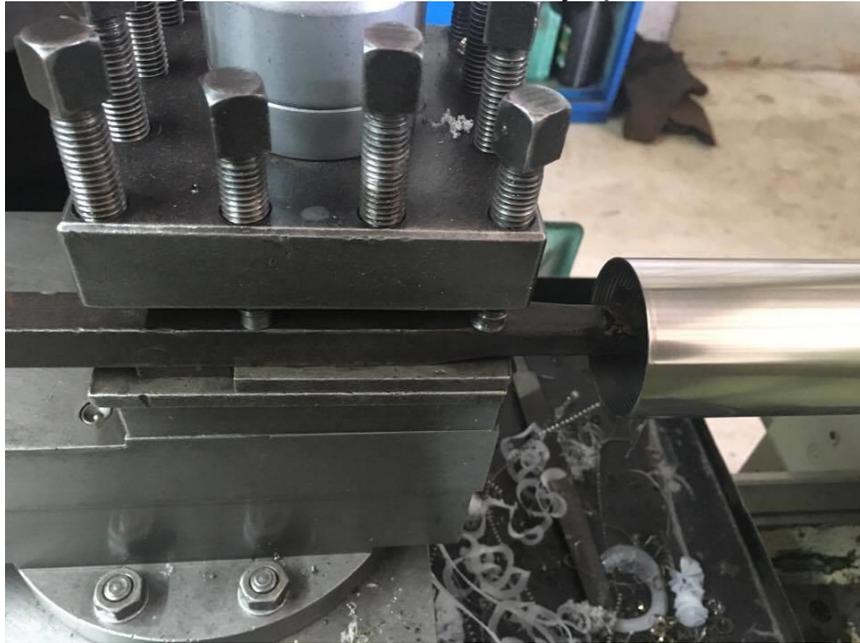
Fonte – Autoria própria.

Após a fabricação da haste e dos demais componentes, foi projetada uma carcaça de aço inoxidável ABNT 304 para proteger as partes do sensor. A carcaça consiste em um tubo com dimensões de 2" de diâmetro e 275 mm de comprimento, com roscas nas duas extremidades e duas tampas, do mesmo material, rosqueadas para fixação do sensor internamente. Para melhor isolamento, dois apoios de nylon foram confeccionados para garantir a concentricidade entre os componentes.

Para a usinagem da carcaça dos sensores e de suas tampas foram utilizados os mesmos parâmetros de usinagem e as mesmas ferramentas usadas na fabricação da haste de aço inoxidável ABNT 304. Do mesmo modo, para usinagem dos apoios de nylon foram utilizados os mesmos parâmetros e as mesmas ferramentas usadas na fabricação do invólucro do núcleo.

A Figura 33 representa a usinagem da rosca interna no tubo da carcaça do sensor LVDT.

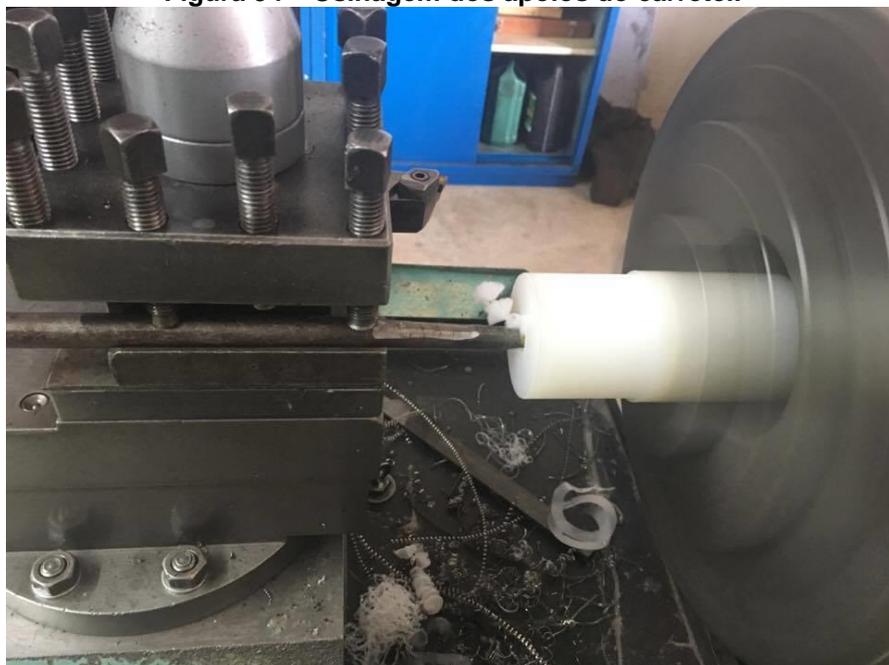
Figura 33 – Usinagem de rosca interna na carcaça, passo 2mm - 12 fios/ pol.



Fonte – Autoria própria.

A Figura 34 demonstra a usinagem dos apoios do carretel utilizados dentro da carcaça.

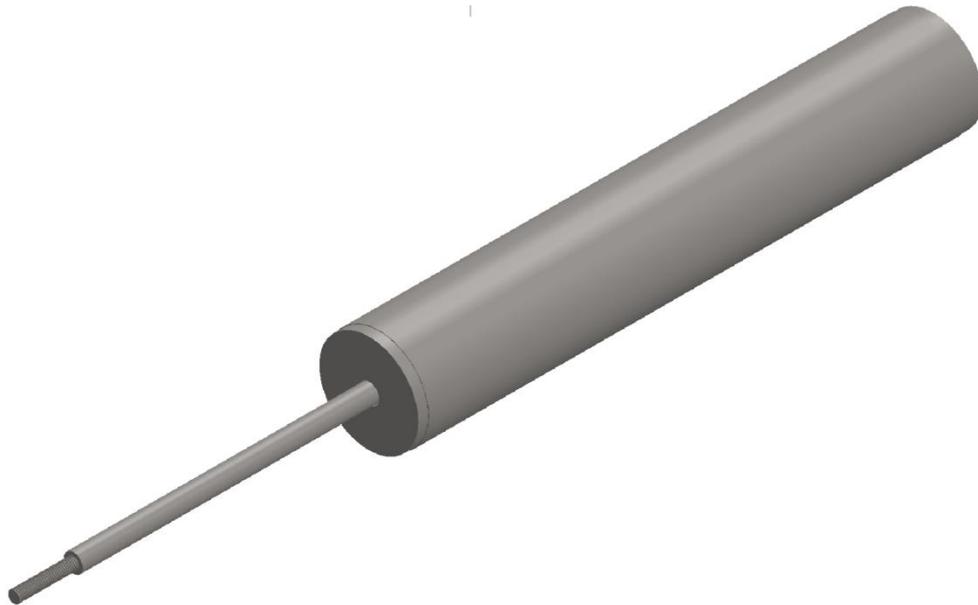
Figura 34 – Usinagem dos apoios do carretel.



Fonte – Autoria própria.

Finalmente a Figura 35 representa o desenho 3D do sensor envolto pela carcaça, exibindo a aparência final do mesmo.

Figura 35 – Projeto com a aparência final do sensor LVDT.



Fonte – Autoria própria.

3.4 Caracterização do sensor LVDT

Após a construção do sensor diversos testes foram realizados de modo a fazer a caracterização do mesmo. Os testes foram realizados com diversas configurações no número de espiras de cada bobina. Além disso, foram realizados testes variando a frequência de excitação com o intuito de alcançar o melhor resultado possível, alta precisão e linearidade. O primeiro tipo de ensaio realizado foi para determinar a melhor proporção entre o número de espiras da bobina primária e das secundárias.

Primeiramente, foram enroladas as três bobinas com o mesmo número de voltas, proporção 1:1, e os testes realizados ocorreram com a análise da variação de tensão de acordo com a movimentação do núcleo. Para se medir a posição do núcleo foi utilizado um sensor do tipo potenciômetro linear da fabricante Opkon, nunca antes utilizado, garantindo assim sua calibração e precisão.

A Tabela 05 demonstra as especificações técnicas do sensor potenciômetro linear da fabricante Opkon.

Tabela 05 – Especificações técnicas sensor Opkon modelo LPT 100

| Especificações técnicas sensor Opkon LPT 100 | |
|---|-----------------------|
| Curso de medição | 150 mm |
| Linearidade | $\pm 0,05\%$ |
| Repetibilidade | $< 0,01$ mm |
| Resistência | 5 kOhm min. |
| Tolerância de resistência | $\pm 20\%$ |
| Corrente recomendada | $< 1\mu\text{A}$ |
| Tensão aplicada permitida | 28 VDC máx |
| Vida mecânica | 100 milhões de ciclos |
| Material da carcaça | Alumínio |
| Material da haste | Aço inoxidável |
| Diâmetro da haste | 6 mm |
| Temperatura de operação | - 20°C ... + 80°C |

Fonte – Adaptado de Opkon (2012).

Esse tipo de sensor possui as mesmas características do sensor construído neste projeto, com o fim de realizar a comparação de modo preciso.

Juntamente com o sensor foi utilizado um indicador digital microprocessado, modelo HW 7000, da fabricante COEL. Os dados técnicos do indicador estão descritos na Tabela 06.

Tabela 06 – Dados técnicos indicador digital COEL HW 7000.

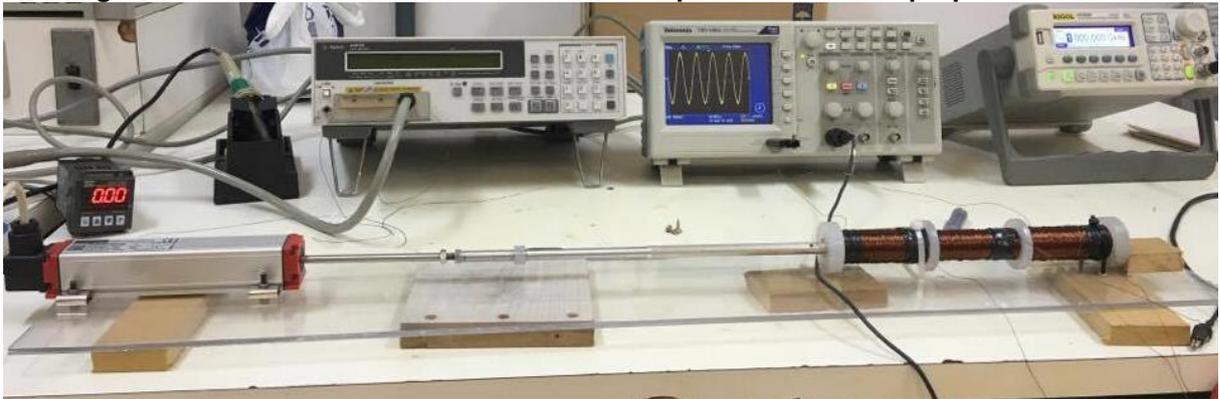
| Dados técnicos COEL HW 7000 | |
|------------------------------------|------------------------|
| Alimentação ($\pm 10\%$) | 100 a 240 VAC |
| Frequência de rede | 48 a 62 Hz |
| Entrada potenciométrica | Impedância > 1 kOhm |
| Resolução | 1 ; 0,1 ; 0,01 ; 0,001 |
| Precisão de indicação | $\pm 0,15\%$ |
| Vida útil | 1.000.000 de operações |
| Temperatura de operação | 0 a + 55°C |

Fonte – Adaptado COEL (2012).

Para determinar a melhor proporção de espiras entre as bobinas foram fixadas a tensão e a frequência com valores de 2 Vrms e 1 kHz, respectivamente.

Foram medidas, ainda, a indutância e a resistência de cada bobina para cada configuração de enrolamento, com diminuição constante do número de voltas da bobina primária e manutenção do número de voltas nas bobinas secundárias. A Figura 36, demonstra a bancada de testes e o acoplamento entre o sensor do tipo potenciômetro linear utilizado para medir o deslocamento do núcleo do sensor LVDT a ser caracterizado:

Figura 36 – Ensaio de deslocamento do núcleo para determinar a proporcionalidade.



Fonte – Autoria própria.

A tensão e a frequência aplicadas na bobina primária foram obtidas a partir de um gerador de função, enquanto a resposta e a senoide gerada na saída das bobinas secundárias, ligadas em série, foram medidas a partir de um osciloscópio. Para a realização das medidas de indutância e resistência foi utilizado um LCR meter, todos demonstrados na imagem acima. Para efeitos de comparação entre os resultados obtidos entre todas as configurações de números de voltas nas bobinas, para a determinação da proporção ideal, foi gerado um gráfico com todos os resultados obtidos.

O melhor resultado é indicado naquele em que a tensão máxima for maior juntamente com maior linearidade no gráfico. Primeiramente, todos os testes foram realizados com a haste fabricada com alumínio, com o sensor operando sem a carcaça. Testes com um número de voltas menor que 550 espiras na bobina primária não foram realizados devido ao fato de ruído presente na senoide ser muito elevado, ocasionando uma variação de tensão muito grande em uma posição fixa do núcleo. Para se determinar qual é a melhor frequência de operação, foram realizados testes variando a frequência no ponto de maior e menor amplitude de

tensão. Assim, pode-se determinar qual é faixa de frequência em que o sensor pode trabalhar nas determinadas configurações sem alterar sua precisão.

Após a realização dos testes de proporcionalidade e de maneira a identificar a melhor quantidade de espiras nas bobinas, na proporção com os melhores resultados obtidos, foram realizados testes variando a posição do núcleo com a tensão e a frequência fixadas em 2 Vrms e 1 kHz, respectivamente. As configurações nas quais foram analisadas as respostas na saída da bobina secundária, com o sensor montado com haste de alumínio, foram: 550 / 1100; 900 / 1800; 1100 / 2200 espiras; 1300 / 2600 espiras; 1500 / 3000 espiras. Todos realizados sem a carcaça.

Para realizar a comparação entre os resultados foram medidas a indutância e a resistência em cada configuração, visto que duas bobinas com o mesmo número de voltas podem apresentar diferentes valores de indutância e de resistência. Deste modo, foram aferidas essas grandezas para a confirmação que os valores de indutância e de resistência, entre as bobinas secundárias, fossem os mais próximos.

Após a aferição das indutâncias e da obtenção dos dados diversos gráficos comparativos foram realizados de modo a se obter o melhor resultado possível juntamente com a configuração ideal. Encontrada a configuração ideal para o sensor operando com haste de alumínio, foi realizado o teste de variação de frequência, para se tomar conhecimento de qual é a faixa de operação do sensor nesta configuração. Realizados os testes com a haste de alumínio, deu-se início aos testes com a haste de aço inoxidável ABNT 304. Os testes com a haste de aço inoxidável foram realizados em três configurações diferentes de bobinas. Fixando a tensão em 2 Vrms e com frequência fixada de 1 kHz. As configurações nas quais foram analisadas as respostas na saída da bobina secundária, com a haste de inox 304, foram: 1100 / 2200 espiras; 1300 / 2600 espiras; 1500 / 3000 espiras.

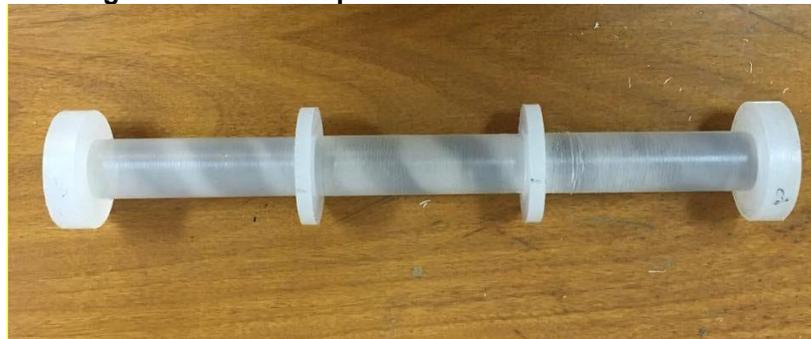
Feito o teste de variação de posição do núcleo e descoberta a melhor configuração para o sensor operando com a haste de inox, foi realizado o teste de variação de frequência, para se determinar a faixa de operação do sensor com haste de aço inox 304, sem a carcaça. Após a realização dos testes com as duas hastes foi descoberta com qual configuração e qual material de haste o sensor apresenta o melhor sinal. Feito isso, foi montado o sensor dentro de sua capsula de modo a ser feito o teste final de linearidade e de variação de frequência para comprovação dos resultados obtidos.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Conforme o desenvolvimento do processo de fabricação dos componentes do sensor, cada parte foi sendo obtida para assim posteriormente ser realizada a montagem final do LVDT construído.

Primeiramente construiu-se o carretel para alocação das bobinas. A Figura 37 representa este componente após sua usinagem.

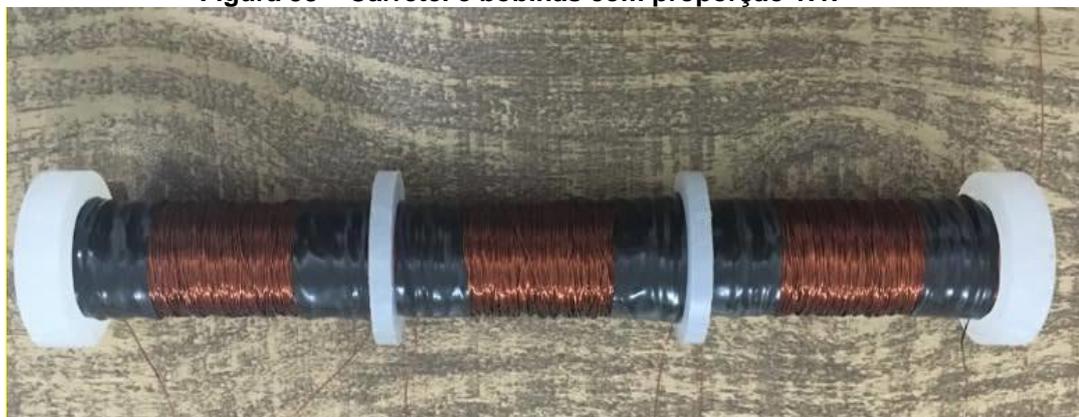
Figura 37 – Carretel para enrolamentos das bobinas.



Fonte – Autoria própria.

Realizada a fabricação do carretel, pode-se realizar o enrolamento das bobinas constituintes do sensor com fio de bitola 27 AWG. A Figura 38 representa o formato final do carretel e as bobinas após a realização do primeiro enrolamento.

Figura 38 – Carretel e bobinas com proporção 1:1.



Fonte – Autoria própria.

Realizado o enrolamento, realizou-se o a fabricação dos componentes móveis do sensor. Após a aquisição das peças de ferrite e da fabricação do invólucro do núcleo, foi realizada a fabricação da haste do sensor.

O formato final da haste, após sua fabricação está demonstrado na Figura 39.

Figura 39 – Haste de aço inoxidável do sensor LVDT.



Fonte – Autoria própria.

Posteriormente foi realizado o acoplamento entre os componentes do núcleo e a haste, a Figura 40 representa esta junção.

Figura 40 – Haste e núcleo acoplados.



Fonte – Autoria própria.

Enfim após a fabricação dos componentes internos do sensor, iniciou-se a o processo construtivo das partes externas do sensor, que são: tampas, apoios e carcaça. A figura 41 exhibe as duas tampas e os dois apoios confeccionados para alocar o carretel dentro do tubo da carcaça:

Figura 41 – Tampas e apoios frontal e traseiro do sensor LVDT.



Fonte – Autoria própria.

Realizada a fabricação das partes que compõe o sensor LVDT, obteve-se a imagem dos componentes antes da montagem final, Figura 42.

Figura 42 – Componentes do sensor LVDT. Carretel com bobinas disposto internamente do tubo da carcaça.



Fonte – Autoria própria.

Após a fabricação de todos os componentes e de sua montagem, o sensor apresentou o seguinte aspecto físico final, Figura 43:

Figura 43 – Formato final do sensor LVDT após montagem.



Fonte – Autoria própria.

O formato final do sensor atingiu os requisitos exigidos no momento do projeto, obtendo a robustez e a forma física desejada.

Após a obtenção dos componentes do sensor e sua montagem iniciaram-se os testes para a obtenção dos resultados.

O primeiro ensaio realizado foi o teste de proporcionalidade, de maneira a definir a melhor proporção entre a bobina primária e as secundárias.

A Tabela 07, demonstra os valores de indutância e resistência medidos, previamente ao teste de proporcionalidade:

Tabela 07 – Valores de indutâncias e resistência em cada configuração.

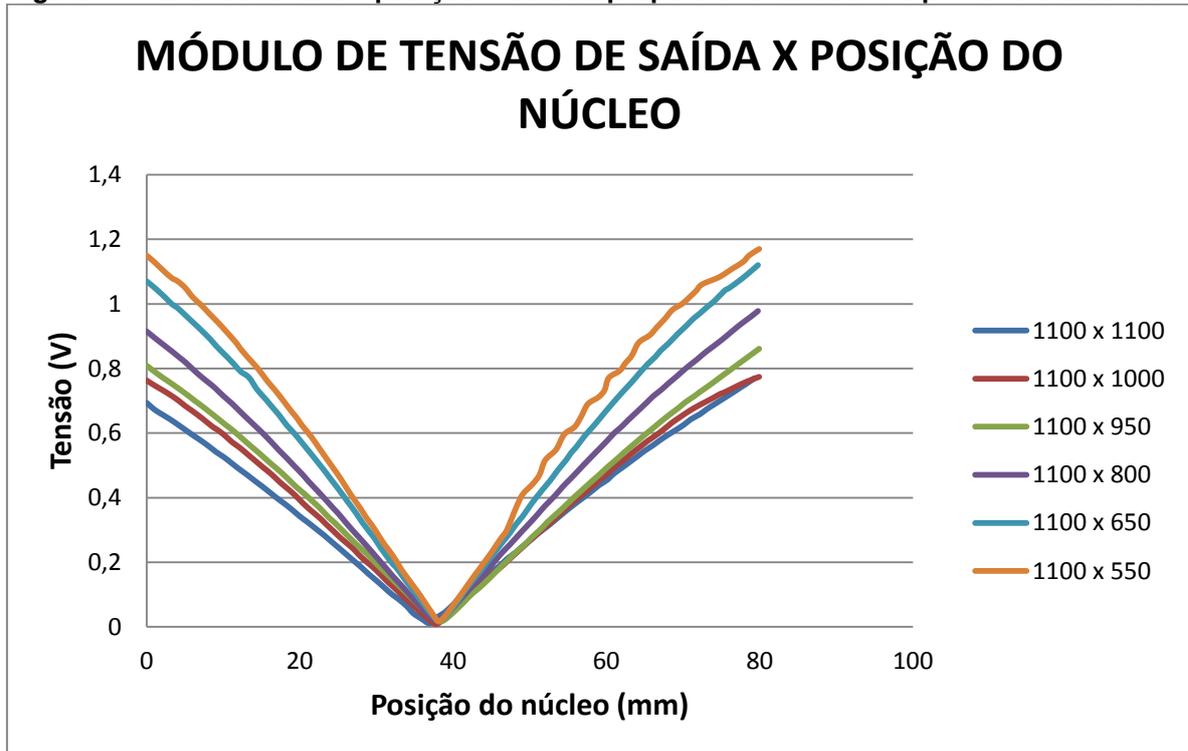
| Teste de proporcionalidade | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Tensão | 2 Vrms | |
| Frequência | 1 KHz | |
| Indutâncias | | |
| N° de espiras (prim/sec) | Indutâncias (prim/sec) | Resistência (prim/sec) |
| 1100 / 1100 | 7,43 mH / 7,41 mH | 14,43 Ohm / 14,3 Ohm |
| 1000 / 1100 | 5,98 mH / 7,41 mH | 12,79 Ohm / 14,3 Ohm |
| 950 / 1100 | 5,35 mH / 7,41 mH | 12,04 Ohm / 14,3 Ohm |
| 800 / 1100 | 3,80 mH / 7,41 mH | 9,99 Ohm / 14,3 Ohm |
| 650 / 1100 | 2,44 mH / 7,41 mH | 7,96 Ohm / 14,3 Ohm |
| 550 / 1100 | 1,73 mH / 7,41 mH | 6,63 Ohm / 14,3 Ohm |

Fonte – Autoria própria.

A indutância e a resistência não variam proporcionalmente com número de voltas devido ao fato do material não ser 100% homogêneo, o enrolamento não ser 100% uniforme e, também, o diâmetro de cada volta aumentar de acordo com que for enrolado encima de outra camada de voltas do fio.

Em conjunto com a aferição de indutância e resistência, foi realizado a plotagem das curvas obtidas em cada configuração. A Figura 44 demonstra o resultado obtido após os testes para a determinação da proporção entre a bobina primária e as bobinas secundárias:

Figura 44 – Gráfico tensão x posição. Teste de proporcionalidade entre primária e secundárias.



Fonte – Autoria própria.

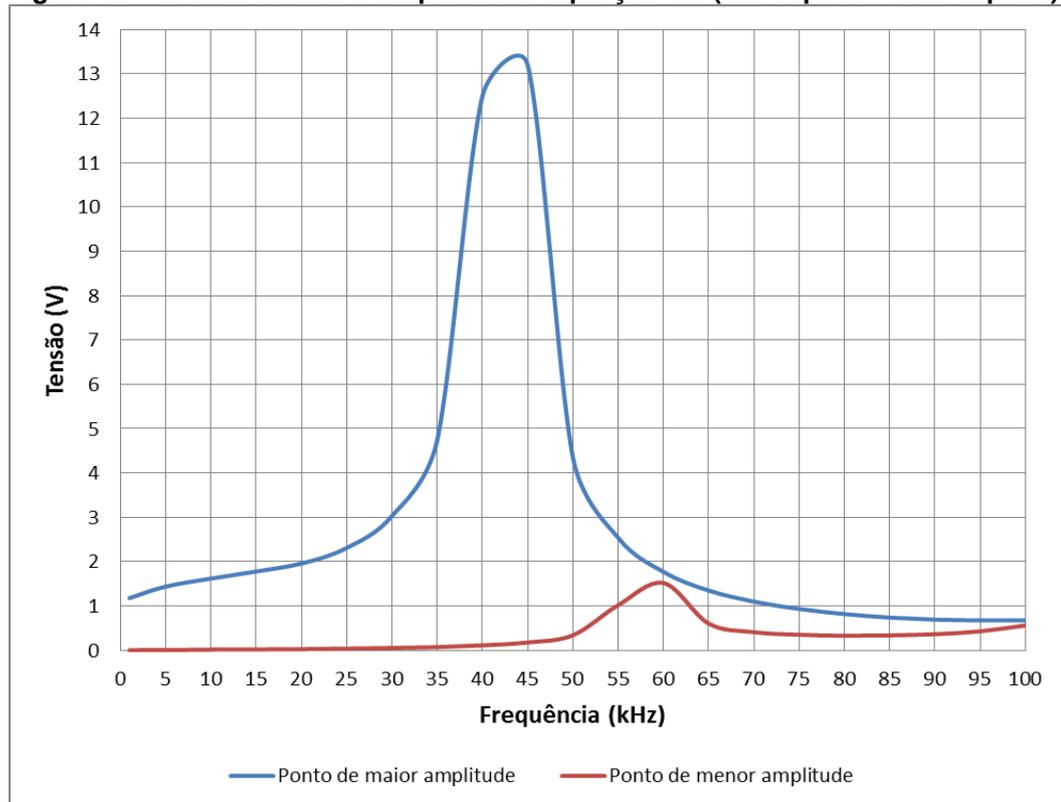
De acordo com os resultados obtidos, a maior tensão avaliada foi com a proporção 1:2 (550 espiras na bobina primárias e 1100 na bobina secundária), sendo o valor de tensão máximo obtido de 1,17 Vrms. Quanto maior a tensão, menor é a perda de energia e maior é a faixa de variação entre a medida de posição, o que facilita a medição e aumenta a precisão da medida.

A partir da análise do gráfico em todas as configurações obteve-se uma simetria entre ambas as retas (decrecente e crescente), exceto na configuração 1:2. A explicação para a falta de linearidade na configuração 1:2 nesse ensaio, não ser a melhor obtida, ocorreu por erros de medições ou de conexão entre os componentes, sendo comprovado, em testes posteriores, que a linearidade nesta configuração é superior.

Encontrada a melhor proporção, foi realizado o teste de variação de frequência nos pontos de maior amplitude (máxima tensão) e de menor amplitude (mínima tensão) também chamado de ponto nulo.

A Figura 45 demonstra os resultados obtidos com a variação de frequência no sensor LVDT com 550 espiras na bobina primária e 1100 espiras nas bobinas secundárias:

Figura 45 – Gráfico tensão x frequência. Proporção 1:2 (550 espiras / 1100 espiras).



Fonte – Autoria própria.

Quanto maior a tensão no ponto de maior amplitude melhor será a qualidade do sinal de saída. Considerando um valor de tensão no ponto nulo, menor que 0,02 Vrms, a faixa de operação do sensor seria de 1 a 10 KHz nesta configuração. Apresentando, assim, com frequência de excitação de 10 KHz, valores de tensão nas grandezas de 1,62 Vrms no ponto de maior amplitude e de 0,018 Vrms no ponto nulo.

Após a identificação da melhor proporção para a configuração das bobinas ser 1:2, diversos testes foram realizados aumentando-se o número de espiras das bobinas.

A tabela 08, demonstra o número de voltas, as indutâncias e as resistências aferidas:

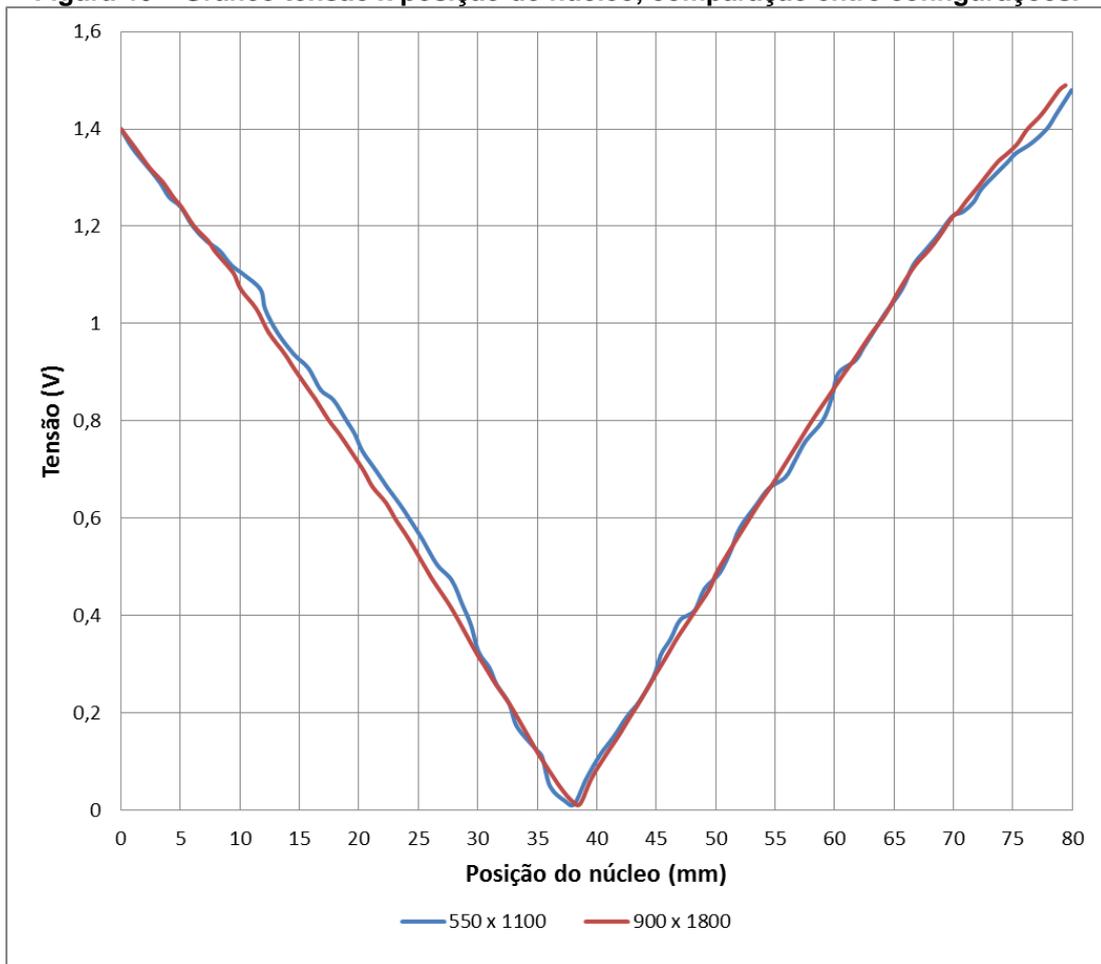
Tabela 08 – Indutâncias e resistências das bobinas em cada configuração.

| | Primária | Secundária 01 | Secundária 02 | Configuração das bobinas |
|-------------------|----------|---------------|---------------|--------------------------|
| Indutância (mH) | 1,73 | 7,41 | 7,4 | 550 / 1100 |
| Resistência (Ohm) | 6,63 | 14,41 | 14,19 | |
| Indutância (mH) | 5,35 | 22,56 | 22,64 | 900 / 1800 |
| Resistência (Ohm) | 12,04 | 25,2 | 25,4 | |
| Indutância (mH) | 7,5 | 34,93 | 34,42 | 1100 / 2200 |
| Resistência (Ohm) | 14,23 | 32 | 31,9 | |
| Indutância (mH) | 10,7 | 51,46 | 51,66 | 1300 / 2600 |
| Resistência (Ohm) | 17,36 | 39,65 | 40,02 | |
| Indutância (mH) | 14,72 | 71,72 | 72,27 | 1500 / 3000 |
| Resistência (Ohm) | 20,41 | 47,67 | 47,92 | |

Fonte – Autoria própria.

Após a aferição da resistência e indutância, e com realização dos testes variando a posição do núcleo com haste de alumínio, três gráficos comparativos foram plotados de modo a identificar a melhor configuração.

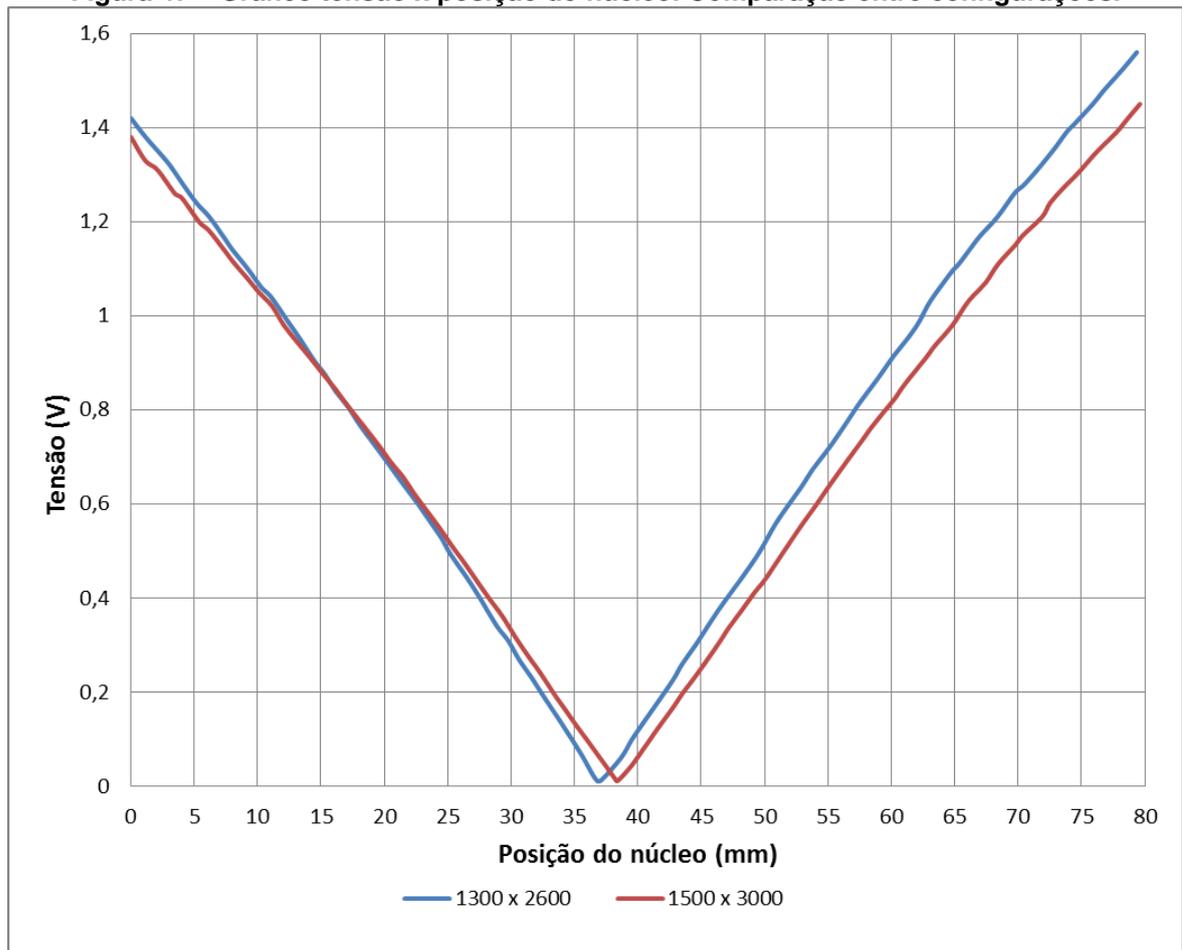
A primeira comparação foi entre o sensor na proporção 1:2 com 550 / 1100 espiras, e o LVDT na proporção 1:2 com 900 / 1800 espiras. A Figura 46 mostra o resultado obtido.

Figura 46 – Gráfico tensão x posição do núcleo, comparação entre configurações.

Fonte – Autoria própria.

O segundo gráfico representa um comparativo entre o sensor configurado com 1300 / 2600 espiras e com 1500 / 3000 espiras. A Figura 47 representa essa comparação.

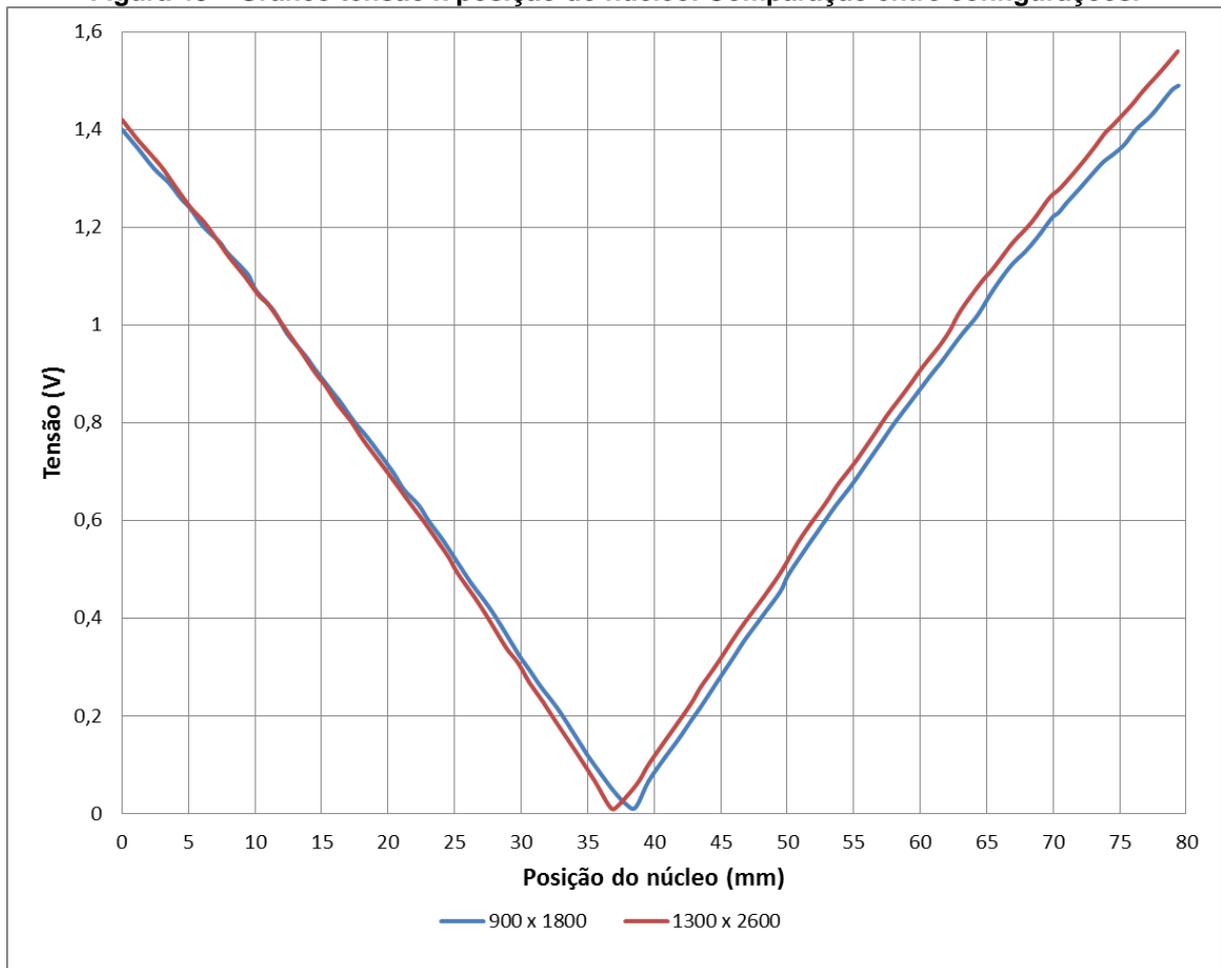
Figura 47 – Gráfico tensão x posição do núcleo. Comparação entre configurações.



Fonte – Autoria própria.

Após a constatação de que no gráfico exibido na Figura 46 apresenta o melhor resultado na configuração 900 / 1800 espiras e, no gráfico na Figura 47 , o sensor apresentou melhor resposta na configuração 1300 / 2600 espiras. Um terceiro gráfico foi plotado para comparar as duas configurações, demonstrado na Figura 48 a seguir:

Figura 48 – Gráfico tensão x posição do núcleo. Comparação entre configurações.

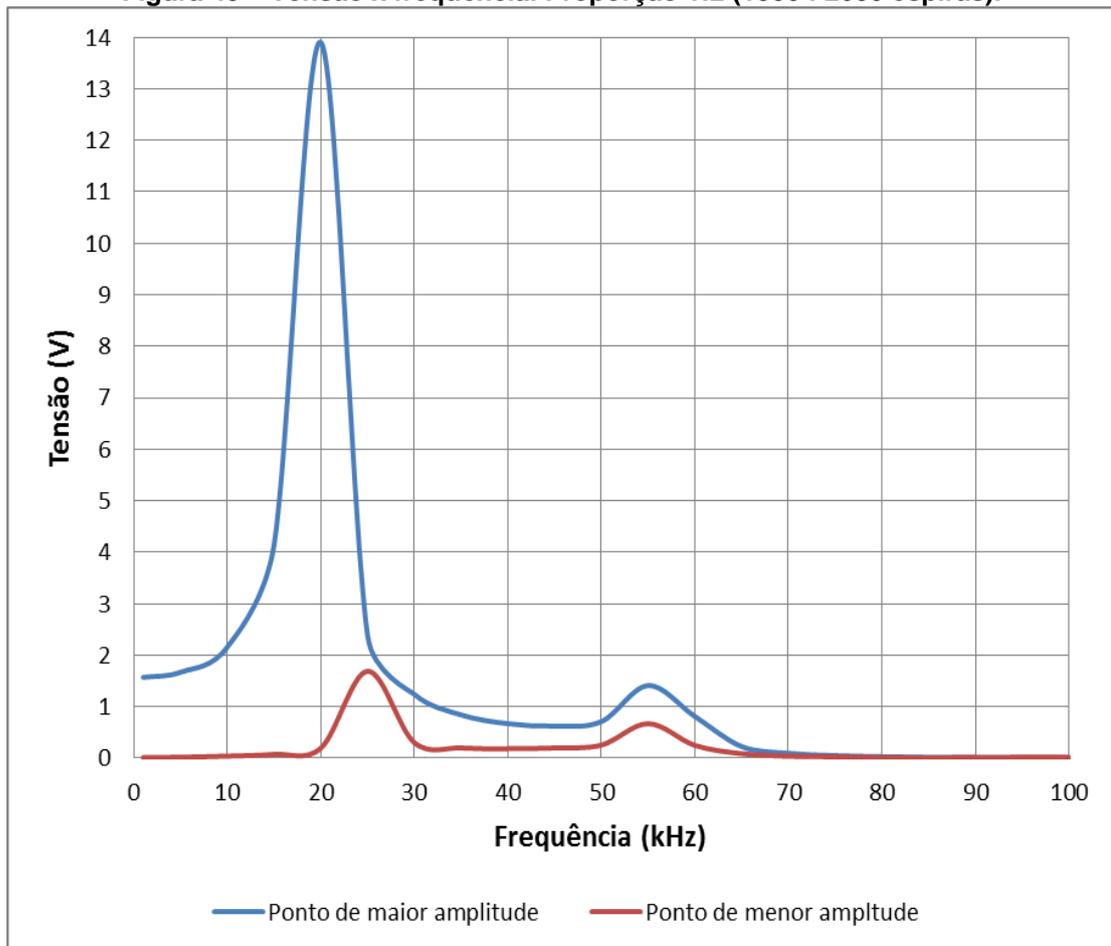


Fonte – Autoria própria.

Por meio da observação dos três gráficos comparativos percebe-se que a melhor configuração do sensor LVDT com haste de alumínio é a de 1300 espiras na bobina primária e 2600 espiras nas bobinas secundárias.

Após a constatação da melhor configuração foi realizado o teste de variação de frequência na configuração indicada para a determinação da faixa de frequência em que o sensor pode operar neste formato. A Figura 49 mostra o resultado obtido.

Figura 49 – Tensão x frequência. Proporção 1:2 (1300 : 2600 espiras).

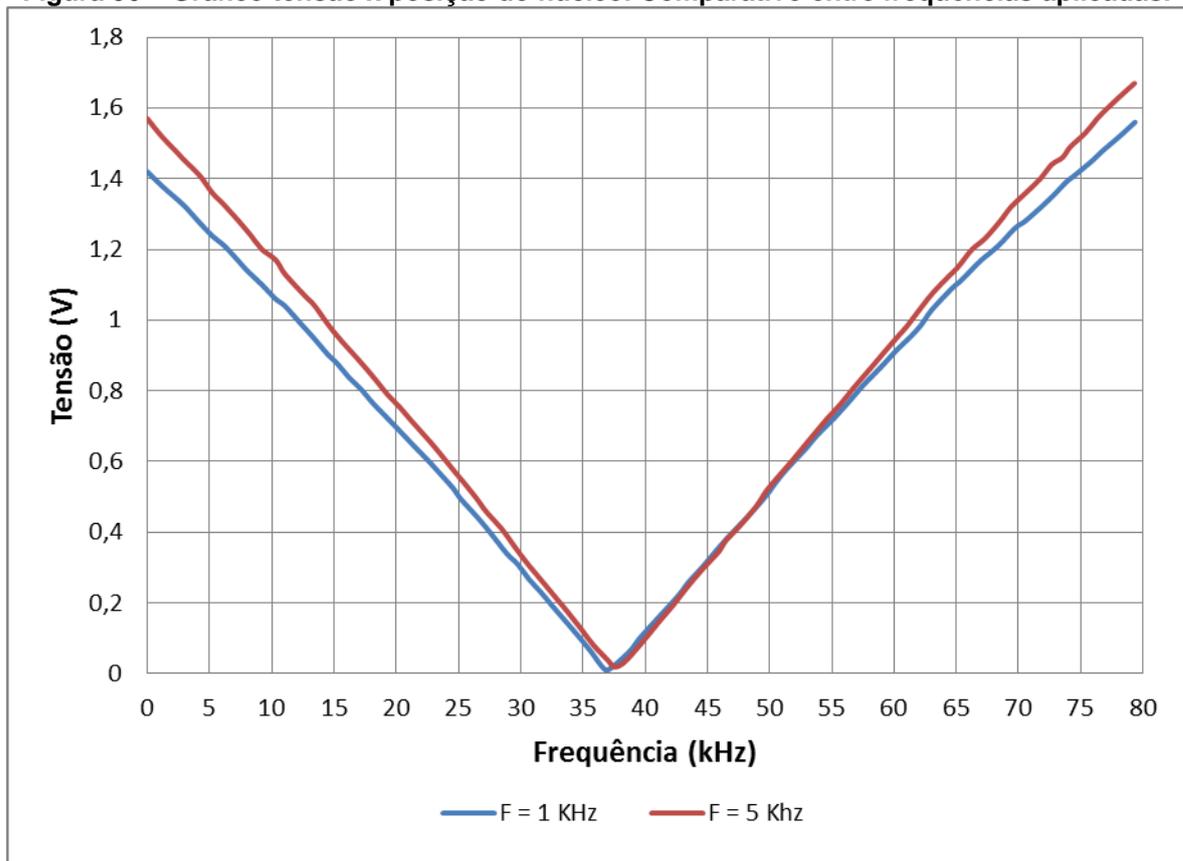


Fonte – Autoria própria.

Por meio da análise do gráfico presente na Figura 49 foi constatado que a faixa de frequência de operação do sensor é entre 1 e 5 kHz. Tendo como valores de tensão medidos a 5 kHz de frequência no ponto de maior e menor amplitude, respectivamente de 1,67 Vrms e 0,02 Vrms.

A fim de obter uma melhor percepção de resultado, foi realizado teste variando a posição no núcleo na configuração 1300 / 2600 com frequência de excitação de 5 KHz e tensão de 2 Vrms com haste de alumínio. Na sequência, os resultados entre as duas diferentes frequências aplicadas na bobina primária foram comparados na Figura 50.

Figura 50 – Gráfico tensão x posição do núcleo. Comparativo entre frequências aplicadas.



Fonte – Autoria própria.

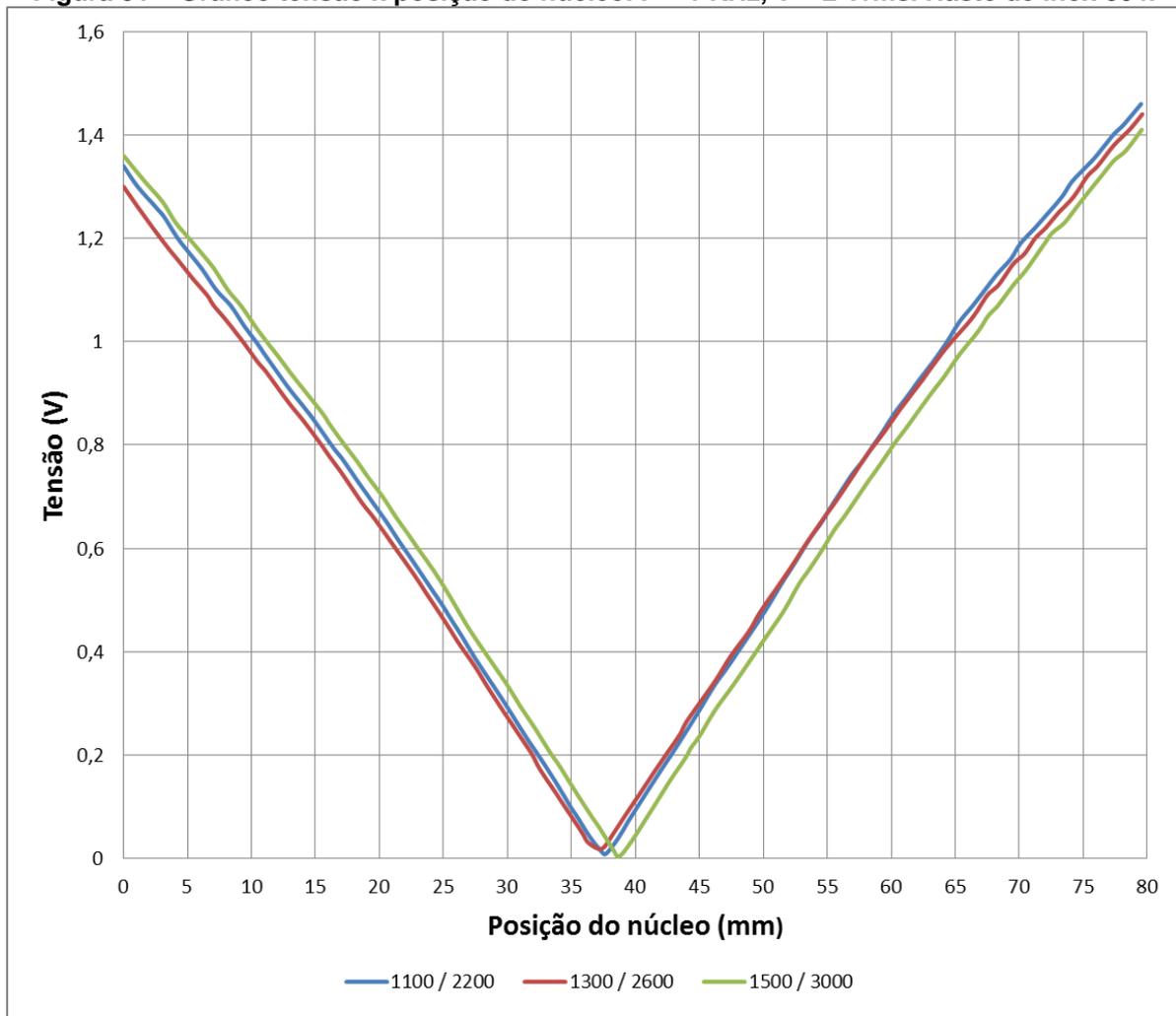
Feito a comparação, nota-se que o resultado obtido a uma frequência aplicada de 5 KHz é melhor do que com $f = 1$ kHz, lembrando que em ambos os testes a tensão aplicada foi de 2 Vrms.

Realizados os testes comparativos com a haste de alumínio, comprovou-se que a melhor resposta obtida foi na configuração 1:2 com 1300 espiras na bobina primária e 2600 espiras nas bobinas secundárias. Também foi encontrada a melhor frequência para se aplicar. Feito isso foram iniciados os testes com haste de aço inoxidável, para se descobrir com qual material a resposta do sensor LVDT construído irá ser melhor.

Os testes foram realizados da mesma maneira dos anteriores, com haste de alumínio, tendo como tensão e frequência fixadas em 2 Vrms e 1 kHz respectivamente.

Após a obtenção dos dados foram plotadas a curva tensão x posição do núcleo entre as configurações testadas com a haste de inox 304, para efeitos comparativos. A Figura 51 representa esta comparação.

Figura 51 – Gráfico tensão x posição do núcleo. F = 1 KHz, V = 2 Vrms. Haste de inox 304.

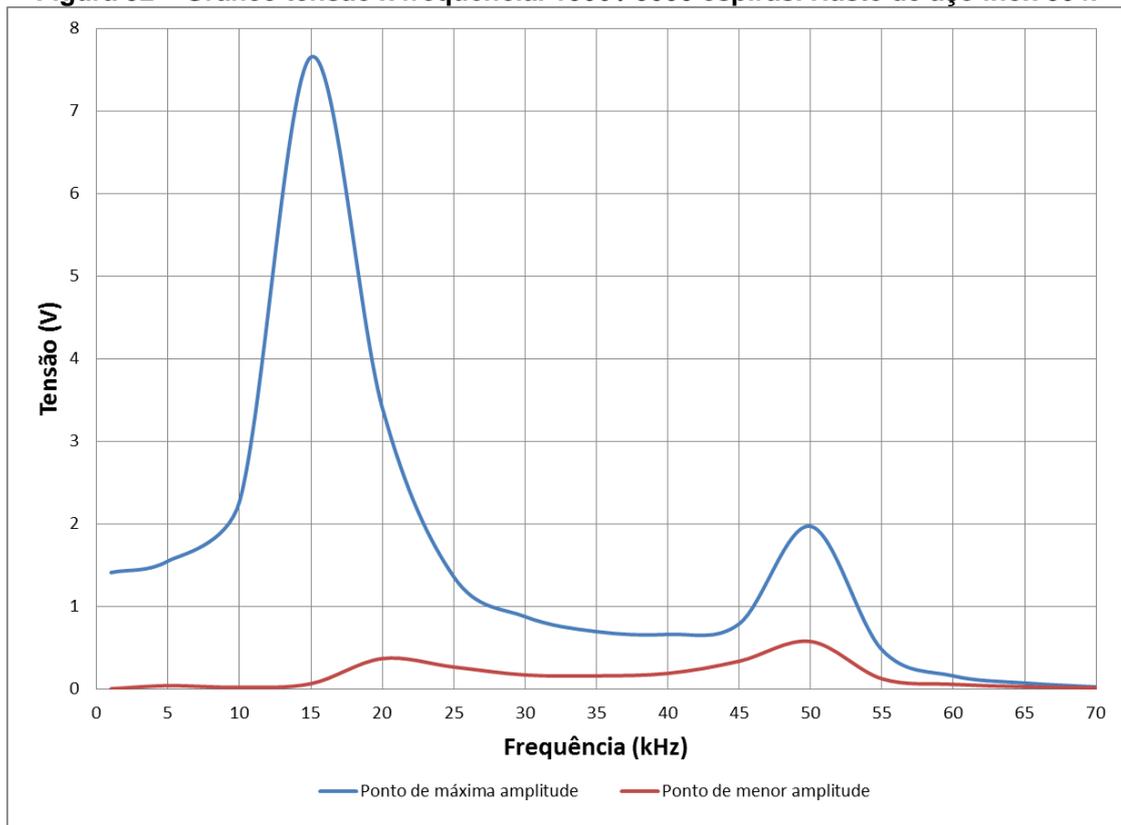


Fonte – Autoria própria.

A partir do gráfico comparativo nos testes realizados com a haste de aço inoxidável, percebe-se que a diferença entre as respostas é muito pequena, mas o resultado obtido com a configuração de bobinas com 1500 / 3000 espiras foi mais estável, principalmente nas extremidades das retas, no ponto de menor linearidade. Outro fato notado foi que a qualidade da senoide gerada durante os ensaios foi melhor e mais estável, comparando com os resultados obtidos com a haste de alumínio.

Assim, foi realizado o teste de variação de frequência com haste de aço inoxidável, na configuração de 1500 / 3000 espiras, de modo a descobrir qual a faixa de frequência em que o sensor pode operar nessa disposição. A Figura 52 demonstra os resultados obtidos neste ensaio.

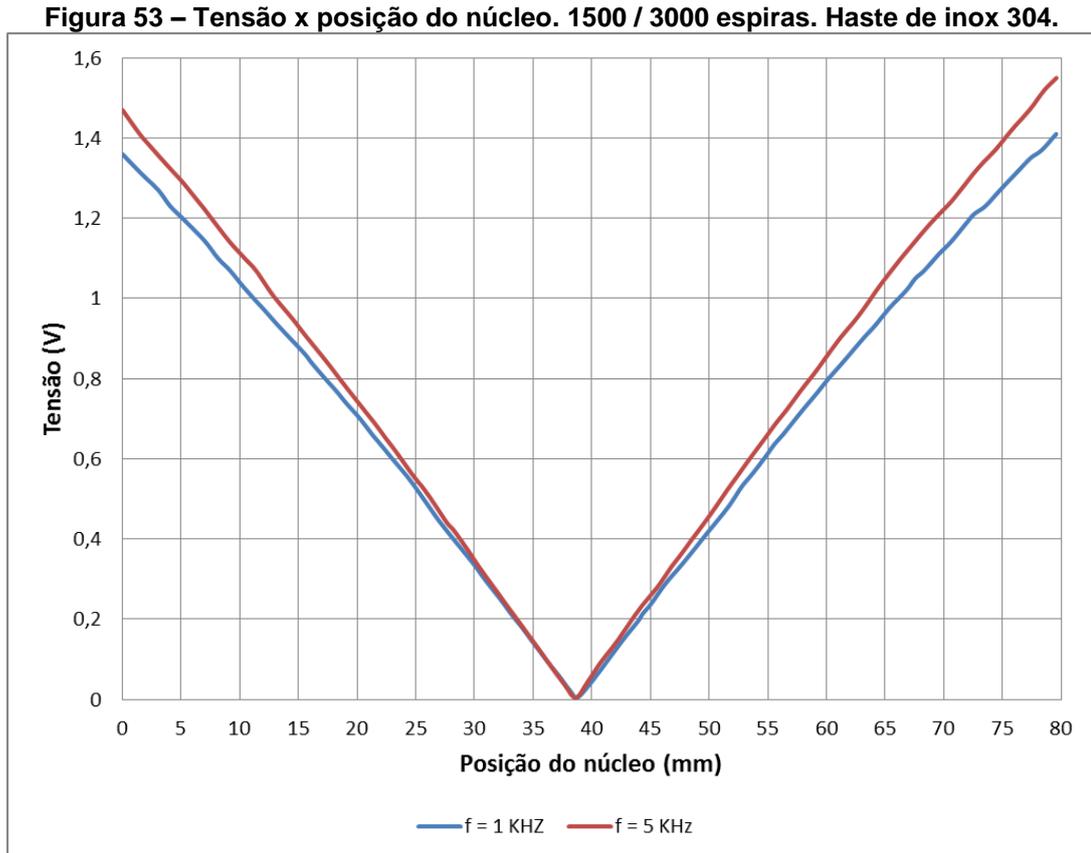
Figura 52 – Gráfico tensão x frequência. 1500 / 3000 espiras. Haste de aço inox 304.



Fonte – Autoria própria.

Realizada a análise do gráfico, representado na Figura 52, nota-se que a faixa de frequência em que o sensor pode operar nessa configuração é estreita. Sendo que em 5 kHz a tensão máxima obtida foi de 1,55 Vrms no ponto de maior amplitude, mas em contrapartida a tensão no ponto nulo foi de 0,035 Vrms. Com a percepção desse detalhe foi realizado um teste de variação da posição do núcleo para ser comparado com o resultado do teste realizado anteriormente com tensão e frequência aplicadas de 2 Vrms e 1 KHz respectivamente.

A Figura 53 representa a comparação entre os testes realizados com tensão fixa de 2 Vrms e frequências de 1 KHz e 5 kHz respectivamente. Ambos os testes foram realizados na configuração 1500 / 3000 espiras com haste de aço inoxidável.



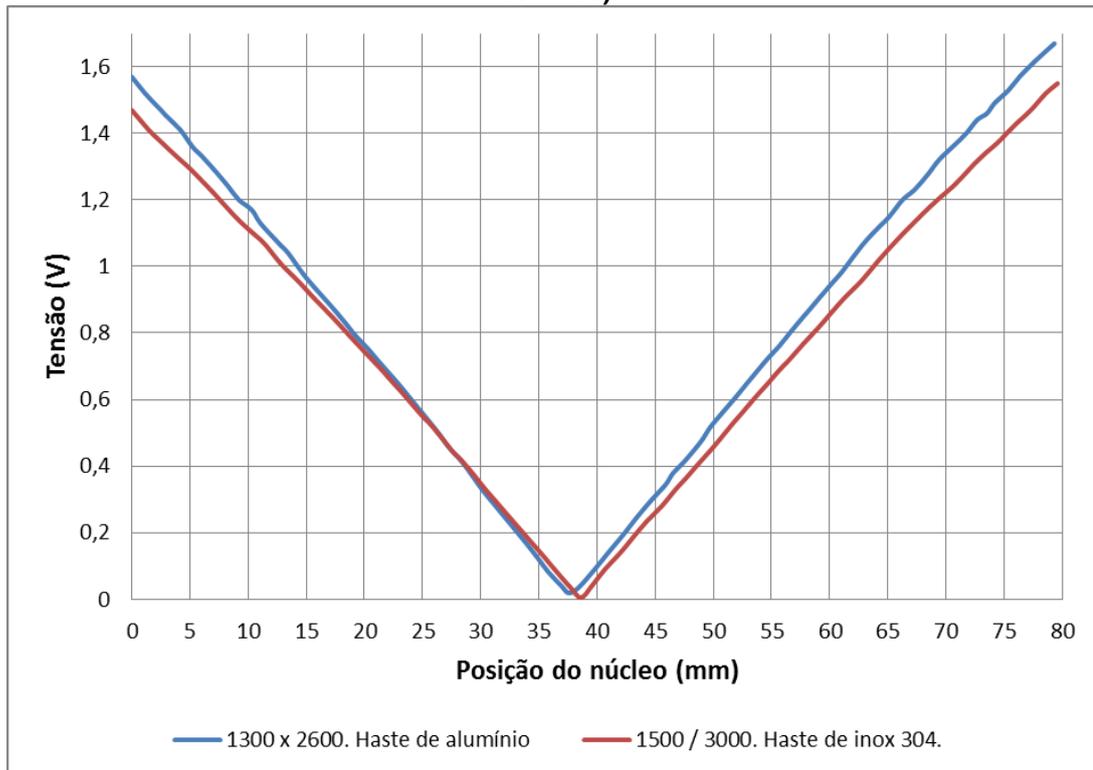
Fonte – Autoria própria.

A partir da Figura 53 nota-se que para esse número de espiras o sensor apresenta um melhor resultado com haste de aço inoxidável e com 5 kHz de frequência aplicada na bobina primária.

Finalmente, de maneira a se determinar o melhor resultado, foi realizada a comparação entre o melhor resultado obtido com haste de alumínio e o melhor resultado obtido com haste aço inoxidável 304. Ambos os resultados foram obtidos com a tensão de 2 Vrms e 5 kHz de frequência aplicada na bobina primária.

Portanto, a Figura 54 representa a comparação entre os melhores resultados obtidos com cada haste:

Figura 54 – Tensão x posição do núcleo. Comparativo entre melhores resultados (Inox 304 x Alumínio).



Fonte – Autoria própria.

Na Figura 54 pode-se observar que em ambos os casos obteve-se um bom resultado, visto que o sinal ainda não está sendo filtrado pelo circuito condicionador que irá ser utilizado no sensor. De modo a definir como será montado o sensor LVDT, pode-se observar que apesar de a tensão no ponto máximo ter sido maior com a haste de alumínio, o sinal na área de não linearidade foi melhor com a haste de inox 304, gerando duas retas mais uniformes.

Dessa forma, a Tabela 09 representa qual o sinal aplicado e qual a configuração das bobinas do sensor LVDT, construído nesse trabalho, que apresentou o melhor resultado obtido dentre todos os testes realizados:

Tabela 09 – Configuração final do sensor LVDT.

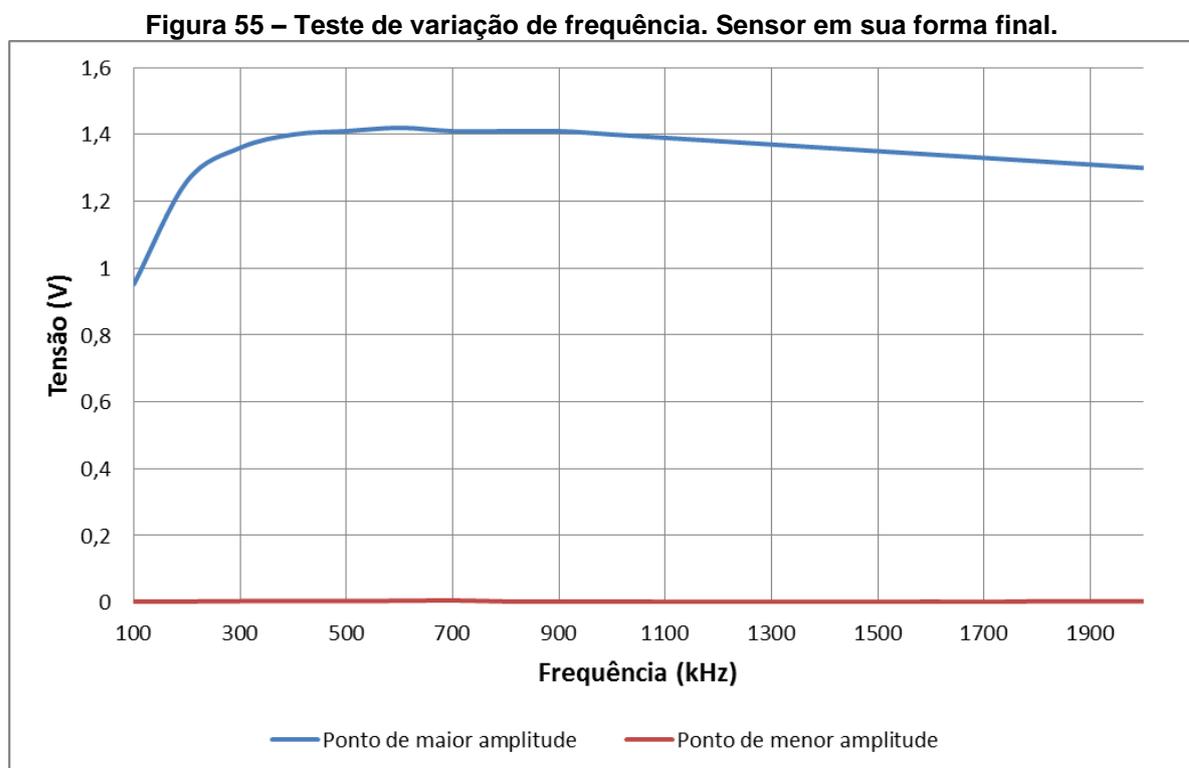
| | |
|---|--------------------|
| Tensão de entrada | 2 Vrms |
| Frequência de operação | 1 a 5 kHz |
| Material da haste | Aço inoxidável 304 |
| N° de espiras na bobina primária | 1500 |
| N° de espiras na bobina secundária | 3000 |

Fonte – Autoria própria.

Todos os testes até aqui apresentados foram realizados sem a carcaça, de aço inox 304, que envolve o sensor. Após descoberta a melhor configuração, o sensor foi montado e novos testes foram realizados, para a confirmação dos dados obtidos até então.

Primeiramente foi realizado o teste de variação de frequência do sensor LVDT na configuração 1500 / 3000 espiras, com a haste de aço inoxidável 304 e em seu formato final dentro de sua carcaça, a tensão aplicada foi de 2 Vrms.

A Figura 55 apresenta o resultado obtido.



Fonte – Autoria própria.

Analisando o gráfico do teste onde a frequência foi variada, notou-se que a carcaça apresentou influência no campo eletromagnético, devido ao fato de a estrutura atuar como uma bobina fechada, em curto. A faixa de frequência de operação em que o sensor pode operar diminuiu, se comparado com o resultado do mesmo teste realizado, com a mesma configuração de bobinas mas sem a carcaça. O ponto de maior amplitude foi atingido com frequência de apenas 600 Hz com tensão de resposta de 1,42 Vrms. A Tabela 10 representa a comparação do resultado dos testes de variação de frequência, na configuração 1500 / 3000 espiras, com e sem carcaça.

Tabela 10 – Comparativo entre teste de frequência. Com e sem carcaça.

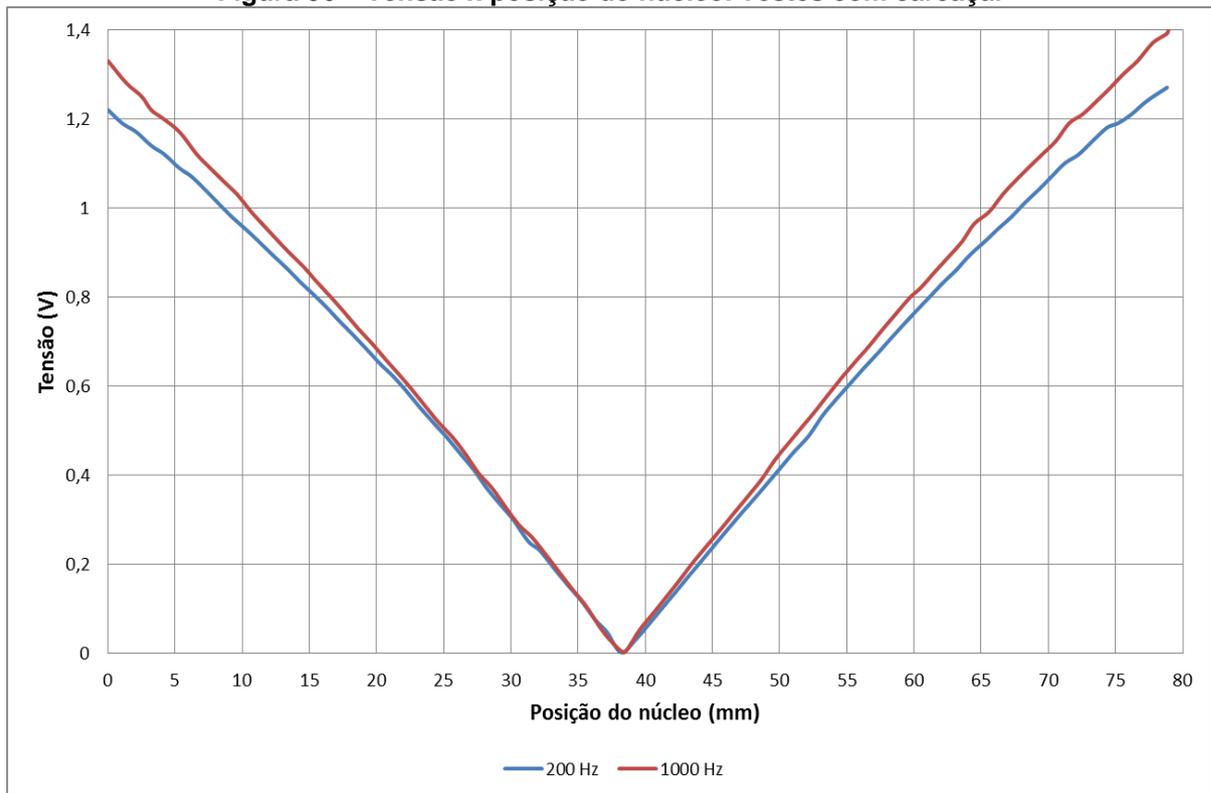
| Ponto de maior amplitude | | |
|--------------------------|---------------------|--------------------|
| COM CARÇAÇA | Frequência (KHz) | SEM CARÇAÇA |
| Tensão (V) | | Tensão (V) |
| 1,4 | 1 | 1,41 |
| 0,825 | 5 | 1,55 |
| 0,631 | 10 | 2,27 |
| 0,737 | 15 | 7,65 |
| 1,17 | 20 | 3,41 |
| 1,39 | 25 | 1,36 |
| 0,802 | 30 | 0,876 |

Fonte – Autoria própria.

Analisando os dados notou-se que a carcaça construída a partir de aço inoxidável 304 influenciou diretamente na faixa de frequência em que o sensor pode operar. Essa redução na faixa de frequência pode ser prejudicial, pois não é adequado trabalhar próximo a frequência de ressonância.

Analisado a faixa de frequência de operação do sensor com a carcaça, e no intuito de testar a linearidade do sensor LVDT construído com a carcaça, testes de variação de posição do núcleo também foram realizados. Dois testes foram realizados mantendo a tensão de 2 Vrms fixa, mas com frequências diferentes. Um dos testes foi realizado com frequência de 200 Hz e o outro com frequência aplicada de 1000 Hz. A Figura 56 representa a comparação do resultado de ambos.

Figura 56 – Tensão x posição do núcleo. Testes com carcaça.



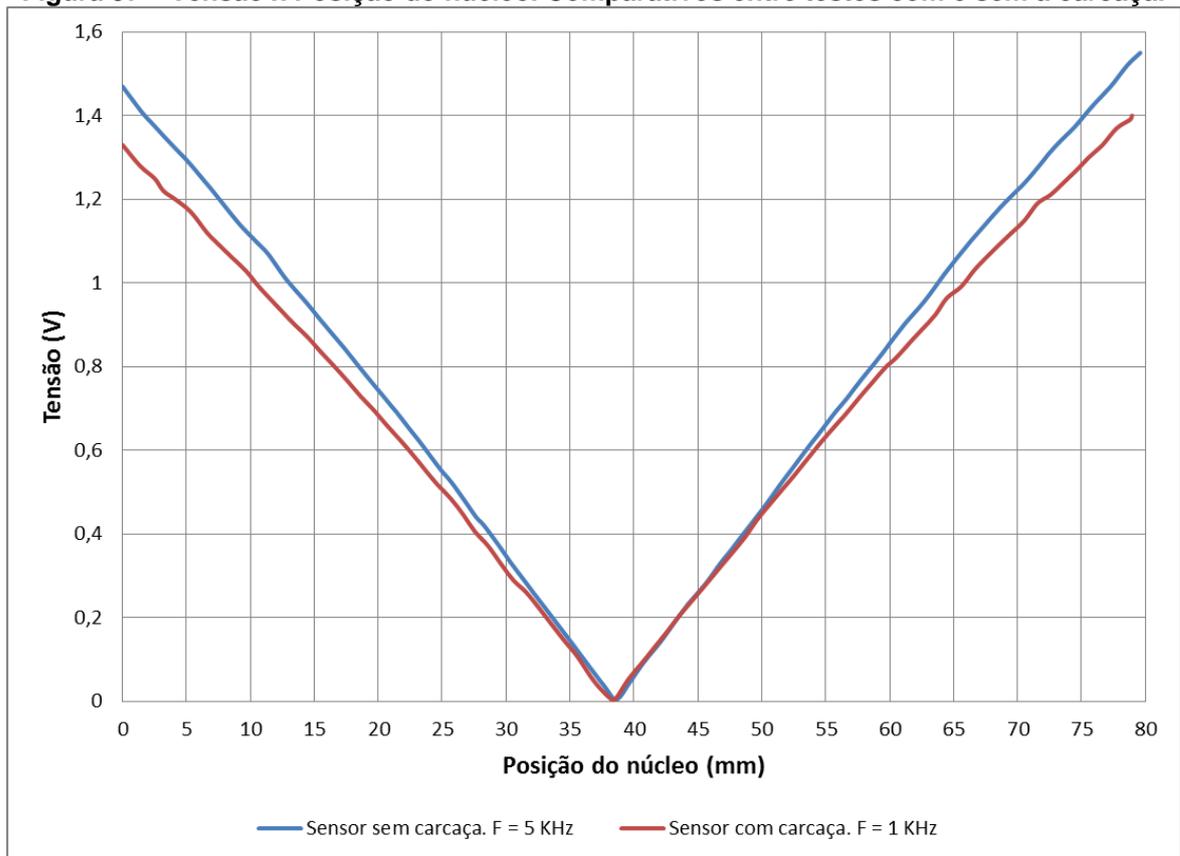
Fonte – Autoria própria.

Comparando as curvas notou-se que a uma frequência de 1000 Hz a resposta do sensor com a carcaça é a melhor obtida.

De maneira a comparar os resultados encontrados com e sem a carcaça, foi plotado as curvas com os melhores resultados em ambos os casos. A tensão utilizada nos dois testes foi de 2 Vrms, com frequências de 1 kHz e 5 kHz nos testes com e sem carcaça.

A Figura 57 apresenta o quadro comparativo entre os dois resultados na configuração 1500 / 3000 espiras.

Figura 57 – Tensão x Posição do núcleo. Comparativos entre testes com e sem a carcaça.



Fonte – Autoria própria.

Observando os gráficos comparativos, percebeu-se que o encapsulamento do sensor LVDT dentro de uma estrutura de aço inoxidável 304, prejudica na qualidade do sinal de resposta do transdutor, tanto na linearidade quanto na faixa de frequência de operação. Exigindo assim um estudo aprofundado do efeito da estrutura no sinal de resposta.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a obtenção de todos os resultados, conclui-se que o sensor LVDT construído nesse trabalho atingiu os requisitos estipulados para a sua aplicação em um seguidor solar

A caracterização do sensor, nos possibilitou a percepção de que com a configuração final, obteve-se uma resposta linear, visto que após a implementação do circuito retificador do sinal de resposta será melhorada.

A respeito do material utilizado na confecção do carretel, notou-se que apesar da dificuldade para uma usinagem com alta precisão, o polipropileno fornece os requisitos necessários e sua aplicação é adequada para tal. Uma nova alternativa para trabalho futuros seria a utilização de nylon 6.0, uma vez que a usinabilidade deste material é melhor, comparada ao polipropileno e as propriedades mecânicas são muito parecidas entre os dois materiais. Outra alternativa para confecção do carretel, seria a fabricação deste com comprimento da bobina primária igual a metade do comprimento das bobinas secundárias, havendo assim um aumento do curso total do sensor LVDT, sem um grande aumento em seu comprimento total.

Para o enrolamento das bobinas, não há dúvidas de que o melhor material a ser utilizado é o cobre esmaltado. Em relação a proporção entre bobina primária e secundárias e ao número de espiras em cada bobina, provou-se que para a utilização do fio com bitola 27 awg e que para as dimensões do sensor construído neste trabalho, a proporção 1:2 e a configuração 1500 / 3000 espiras foi a melhor encontrada. Isso pode ser explicado pelo fato de que nesta constituição, há uma predominância maior da indutância sobre a resistência em cada enrolamento. Visando possíveis trabalhos futuros, a realização da mesma caracterização do sensor LVDT aplicada neste trabalho, mas com a utilização de fios com diferentes bitolas neste mesmo carretel, poderá ser uma alternativa para se alcançar melhores resultados.

Na fabricação da haste, a usinagem do alumínio é muito mais facilitada em comparação com a do aço inoxidável 304. O desgaste da ferramenta de corte é muito menor no alumínio devido as propriedades mecânicas do material. Em contrapartida, a resposta do sinal e a resistência ao meio é muito melhor com a utilização da haste de aço inoxidável 304, além do mais o uso da haste de alumínio

gera interferência e corrente de fuga, devido ao fato de o material ser um bom condutor.

Em relação ao material utilizado no núcleo, o ferrite revelou-se eficiente na geração do campo eletromagnético. Sua disponibilidade nas dimensões desejadas, principalmente com formatos cilíndricos de comprimento maiores que 100 milímetros é de difícil aquisição. Desta maneira, tornou-se necessária a fabricação do invólucro do núcleo para realizar a junção dos ferrite e se alcançar o comprimento necessário. Assim a usinagem do nylon, para o invólucro, em comprimentos elevados e com diâmetro pequeno pode ser uma dificuldade na fabricação de sensores com cursos maiores.

Para possíveis trabalhos futuros a utilização de outro material ferro magnético no lugar do ferrite ou a importação do mesmo com as dimensões necessárias, eliminando a necessidade de fabricação de um invólucro, possa ser uma interessante alternativa para se obter resultados melhores.

Finalmente, no que se diz respeito a carcaça, provou-se que neste caso a utilização de um tubo de aço inoxidável 304 para o encapsulamento do sensor, apesar de não incapacitar a aplicação do sensor no seguidor solar, teve uma grande influência negativa no sinal de saída do LVDT, principalmente no que diz respeito a faixa de frequência de operação. Para possíveis trabalhos futuros a utilização de um sensor fabricado com carcaça composta por outro material possa ser mais conveniente.

6 REFERÊNCIAS

- ABINEE. (2012). **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Retrieved March 30, 2016, from <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (2005). **Energia Solar. Atlas Da Energia Elétrica Do Brasil**, 14. <http://doi.org/mma>
- ALBERTAZZI, A., & Sousa, A. R. De. (2008). **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**.
- ALMEIDA, G. S. M. (2013). **Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema Termoelétrico do tipo Linear Fresnel Reflector Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema Termoelétrico do tipo Linear Fresnel Reflector**, 68.
- ALLOCA, John; STUART, Allen. **Transducers - Theory and Applications**. Reston, Virginia: Reston, 1984. 497 p.
- AYADI, O., & ATARI, Z. (2014). **Design and Manufacturing of Linear Fresnel Reflectors for Industrial Process Heat**. *Jordanian International Mechanical Engineering Conference JIMEC 8*, (May), 7.
- BROWNSON, J. (2014). **Solar Energy Conversion Systems**. Reino Unido: British Library.
- BÜHLER, D., OXLAND, T., & NOLTE, L. (1997). **Design and evolution of a device for measuring three-dimensional micromotions of a press-fit femoral stem protheses**. *Medical Engineering Physics*, 19(2), 187–199.
- CÂMARA, C. F. (2011). **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**, 1–68.
- CICMAC. (2000). **Conceito de Metrologia. Centro Integrado de Capacitação Em Metrologia E Avaliação Da Conformidade**, 2.
- CIEMAT. (2013). **Centro de Investigações Energéticas**. Retrieved from <http://www.ciemat.es>
- CORTEZ, R. J. M. (2013). **Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica**. Universidade do Porto.

CRESESB. (2014). **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos. *Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos*, 53(9), 530.** <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

DE LAQUIL, P. (1993). **Solar-thermal electric technology. *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, 213'297.**

DE PAULA VEIGA & MONTANARIN, C. ; (2007). **Projeto e construção de um transdutor LVDT**, 8. Retrieved from http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/engenharia/tcc/artigo_transdutor_lvdt_2007.pdf

DELONG, R., & DOUGLAS, W. (1991). **An artificial oral environment for testing dental materials. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 38(4), 339–345.**

DUFFIE, J. a., BECKMAN, W. a., & WOREK, W. M. (2003). **Solar Engineering of Thermal Processes, 4nd ed. *Journal of Solar Energy Engineering* (Vol. 116).** <http://doi.org/10.1115/1.2930068>

EFUNDA. (2012). **LVDT Theory**. Retrieved May 12, 2016, from http://www.efunda.com/designstandards/sensors/lvdt/lvdt_theory.cfm

FALCÃO, A. F. O. (2008). **Energia Solar Movimento e posicionamento relativos Terra-Sol. *Recursos Energéticos Renováveis*.**

FELDHOFF, J. F. (2012). **Linear Fresnel Collectors-A Technology Overview.**

FERRAZ DIAS, R. P. (2015). **Transformador Diferencial de Variação Linear – Condicionamento de Sinal e Desmodulação Síncrona.**

GARCIA, D. M. (2013). **Forno solar com lentes de Fresnel.**

GEA, M., SARAVIA, L., ALTAMIRANO, M., PLACCO, C., BÁRCENA, H., & HONGN, M. (2010). **Aspectos óptico geométricos de un concentrador solar fresnel lineal para aplicaciones térmicas. *Avances En Energis Renovables Y Medio Ambiente*, 14.**

GREENPRO. (2004). **Energia Fotovoltaica - Manual Sobre Tecnologias, Projeto e Instalação. *Energia Fotovoltaica - Manual Sobre Tecnologias, Projeto E Instalação*, 53(9), 1689–1699.** <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

GUNTHER, M. (2011). **Advanced CSP Teaching Materials - Linear Fresnel**

Technology. *Advanced CSP Teaching Materials*, 1–43.

HO, C., & PAM, H. (2003). **Inelastic design of low-axially loaded high-strength reinforced concrete columns.** *Journal of Engineering Structures*, 25(4), 1083–1096.

IEA. (2010). **Technology Roadmap Concentrating Solar Power.** *Current*, 5, 1–52. <http://doi.org/10.1787/9789264088139-en>

INMETRO. (2000). **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia** (2nd ed.). Brasília. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

ISOLAPLAT. (2015). **Polipropileno.** Retrieved May 20, 2016, from http://www.isolaplast.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=87&Itemid=139

JONAS, P., & GAZOLI, R. (2012). **Energia solar fotovoltaica – Introdução.**

KALOGIROU, S. A. (2009). **Solar energy engineering: processes and systems.** *Academic Press* (1 ed.). EUA: Elsevier.

LIMA JUNIOR, A. (2012). Lima Junior, P. et al . **O laboratório de mecânica.** Porto Alegre: IF-UFRGS, 2012.

MEAS. (2013). **Technical Paper The LVDT: construction and principles of operation Introduction and purpose The LVDT: construction and principles of operation.** Hampton. Retrieved from www.meas-spec.com

MILLS, D. R., & L. MORRISON, G. (2000). **Compact linear Fresnel reflector solar thermal powerplants".** *Solar Energy Reviews*.

MULLER-STEINHAGER, HANS TRIEB, F. (2004). **Concentrating solar power – A review of the technology.** *Ingenia Review*.

NITAPLAST. (2015). **Propriedade do Polipropileno.** Retrieved May 19, 2016, from <http://www.nitaplast.com.br/propriedades/nitapro.pdf>

OLIVEIRA, M. M. (2008). **Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal.**

PADILHA, Â. F. (2000). **Materiais de Engenharia-Microestrutura e Propriedades.**

Hemus.

PRINSLOO, G., & DOBSON, R. (2014). **Solar Tracking, Sun Tracking, Sun Tracker, Solar Tracker, Follow Sun, Sun Position.** <http://doi.org/10.13140/2.1.2748.3201>

RAJAMANI, R., & HEDRICK, J. (1995). **Adaptive observers for active automotive suspension: theory and experiment.** *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2(1), 86–93.

REVELO, M. A. B. (2015). **Diseño y simulación de un colector solar lineal de Fresnel para la producción de vapor en base a las condiciones climáticas de la ciudad de Quito.**

RIBEIRO, M. A. (2004). **Metrologia Industrial-Fundamentos da Confirmação Metrológica (sexta).**

RONEY, J. . (2013). **World Solar Power Topped 100,000 Megawatts in 2012.** Retrieved from http://www.earth-policy.org/indicators/solar_power_2013.

SSAINT GOBAIN. (2012). **Thermosolar such a story.** Retrieved May 19, 2012, from <http://www.saint-gobain-solar-power.com/saint-gobain-solar-power/thermosolar-such-story-4>

SALAPAKA, S. (2002). **A self compensated smart LVDT transducer.** *Proceeding of American Control Conference*, 3(8-10), 1966–1971.

SÁNCHEZ TAPIA, D. (2011). **Estudio Técnico y Económico de una Instalación Solar con Colectores Lineales Fresnel.** *The Effects of Brief Mindfulness Intervention on Acute Pain Experience: An Examination of Individual Difference*, 1.

SCHAEVITZ, H. (1974). **Handbook of Measurement and Control.** New Jersey.

SENSORWIKI. (2013). **LVDT.** Retrieved May 15, 2016, from http://www.sensorwiki.org/doku.php/sensors/linear_variable_differential_transformer

SMITH, W. (1998). **Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais** (3rd ed.).

SOARES NEGREIROS, I. (2015). **Desenvolvimento do Sistema de Rastreamento de um Protótipo de Concentrador Solar Fresnel Linear,** 53(9), 1689–1699. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

SZCZYRBAK, J., & SCHMIDT, E. (1997). **LVDT signal conditioning techniques**. *Measurements and Control*. (pp. 1–18).

TRANS-TEK. (2012). Core Extension Rods. Retrieved May 19, 2016, from http://www.transtekinc.com/wp-content/uploads/2014/12/Ext_Rod.pdf

WALKER, G. S. (2013). ***Development of a Low Cost Linear Fresnel Solar Concentrator***. Stellenbosch University.

WILSON, J. S. (2005). ***Sensor Technology Handbook***. Burlington.