

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO MONTE DE CARVALHO

**TRANSFORMADOR DIFERENCIAL LINEAR
VARIÁVEL EM RASTREADOR SOLAR PARA UM
SISTEMA DE ENERGIA SOLAR
CONCENTRADA DO TIPO REFLETOR LINEAR
FRESNEL**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2017

BRUNO MONTE DE CARVALHO

**TRANSFORMADOR DIFERENCIAL LINEAR
VARIÁVEL EM RASTREADOR SOLAR PARA
UM SISTEMA DE ENERGIA SOLAR
CONCENTRADA DO TIPO REFLETOR LINEAR
FRESNEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Jean-Marc Stephane Lafay

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Luiz Bertotti

PATO BRANCO

2017

C331t Carvalho, Bruno Monte de.
Transformador diferencial linear variável em rastreador solar para um sistema de energia solar concentrada do tipo refletor linear Fresnel / Bruno Monte de Carvalho. -- 2017.
123 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Jean-Marc Stephane Lafay
Coorientador: Prof. Dr. Fabio Luiz Bertotti
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Pato Branco, PR, 2017.
Bibliografia: f. 113 – 123.

1. Energia solar. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Detectores. 4. Transformadores. I. Lafay, Jean-Marc Stephane, orient. II. Bertotti, Fabio Luiz, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD 22. ed. 621.3

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n.º 058

“Transformador Diferencial Linear Variável em Rastreador Solar para um Sistema de Energia Solar Concentrada do Tipo Refletor Linear Fresnel”

por

Bruno Monte de Carvalho

Dissertação apresentada às treze horas e trinta minutos, do dia vinte e nove de setembro de dois mil e dezessete, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

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

**Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de
Souza**
UNIOESTE/FB

Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico
UTFPR/PB

Prof. Dr. Jean Patric da Costa
Coordenador do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica -
PPGEE/UTFPR

A via original, devidamente assinada, encontra-se na Biblioteca da UTFPR – Câmpus Pato Branco.

Dedico este trabalho, a Deus, aos meus pais Luzia e Abzai, a minha irmã Bruna, ao Danilo, que considero como meu filho, e a minha namorada Luciana.

*Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte,
não temerei mal algum, pois tu estás comigo; a tua
vara e o teu cajado me consolam.*

Salmos 23:4

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte da minha paz e alegria, por me abençoar em todos os momentos e me capacitar.

A minha família, que afirmo sem hesitar, ser a melhor que alguém já teve ou ainda a de ter. Meus pais, Luzia e Abzai e minha irmã Bruna. Agradeço o apoio incondicional, estímulo e amor que sempre recebi.

A minha namorada Luciana e ao Danilo, pelo companheirismo, amor e palavras de carinho.

Aos demais familiares que de alguma forma me apoiaram e contribuíram para que essa etapa fosse concluída.

Ao professor Jean-Marc pela orientação, contribuição, ensinamentos e paciência durante o mestrado.

Ao professor Fábio Bertotti pela co-orientação, disponibilidade de todos os momentos, paciência, ensinamentos, amizade e por ajudar a trilhar o caminho de minha pesquisa.

Aos professores participantes da banca examinadora, César Rafael Claire Torrico e Samuel Nelson Melegari de Souza, pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Aos amigos do PPGEE pelo companheirismo, amizade, rizadas compartilhadas e dúvidas sanadas.

Ao Juliano de Pelegrin pela construção da parte mecânica do sensor LVDT utilizado neste trabalho.

Aos demais professores e funcionários da UTFPR, pelos ensinamentos e contribuições.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação.

RESUMO

Monte de Carvalho, Bruno. TRANSFORMADOR DIFERENCIAL LINEAR VARIÁVEL EM SEGUIDOR SOLAR PARA REFLETOR LINEAR FRESNEL. 2016. 123 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2017.

Este trabalho propõe uma solução para aumentar a eficiência do processo de rastreamento de um sistema de energia solar concentrada (CSP) do tipo Linear Fresnel Reflector (LFR). Um transformador diferencial variável linear (LVDT) foi acoplado ao eixo do espelho refletor para indicar sua posição angular durante o período de funcionamento. A posição obtida por meio do LVDT é entrada de um sistema de controle que foi desenvolvido para compensar a posição angular do espelho refletor nos momentos em que existem perturbações externas ou problemas no sistema mecânico de posicionamento. Foi necessário construir um LVDT de baixo custo, assim como, a estrutura mecânica do sistema refletor e o circuito de instrumentação. O matlab/simulink foi utilizado para simular os modelos elétrico e geométrico do LVDT e o circuito eletrônico de instrumentação. Com relação ao acoplamento do sensor ao eixo do espelho refletor, foi feito através de uma polia. Fez-se uma avaliação, através de simulação, da influência do raio da polia no erro da leitura de posição do espelho, para um mesmo valor de precisão do sensor. Verificou-se também a influência do valor de precisão do sensor no erro de inclinação do espelho refletor. Para determinar na prática a precisão do transdutor realizou-se teste de repetibilidade. Dez curvas de calibração foram obtidas e então foi calculada a margem de erro, com nível de confiança de 99%. Verificou-se então que uma polia com raio de 8,5 cm seria suficiente para controlar a posição do espelho com erro de $0,21^\circ$. A precisão do sistema concentrador foi determinada com o LVDT acoplado a estrutura, também utilizando-se teste de repetibilidade. Dez curvas de calibração foram obtidas e determinou-se a margem de erro, também com nível de confiança de 99%. Foi feita ainda uma avaliação da melhor altura de instalação do receptor para reduzir as perdas de radiação. Além disso, determinou-se a relação entre as perdas de radiação e a distância horizontal de instalação dos espelhos refletores, em relação ao receptor. Na prática o erro máximo na leitura da posição angular do espelho refletor foi de $0,27^\circ$, o que torna possível que 96,92% da radiação refletida pelo espelho mais distante, e 100% da radiação refletida pelos demais espelhos, atinja o receptor posicionado a 3,47 m de altura.

Palavras-chave: Energia solar concentrada, Rastreador Solar, Refletor Linear Fresnel, Transformador Diferencial Linear Variável, Sensor de posição.

ABSTRACT

Monte de Carvalho, Bruno. Linear Variable Differential Transformer in solar tracker for a concentrated solar energy system of linear fresnel reflector type . 2017. 123 f. Master Thesis - Post-Graduation Program in Electrical Engineering, Federal Technological University of Paraná, Pato Branco, PR, 2017.

This work proposes a solution to increase the efficiency of the tracking process of a Linear Fresnel Reflector (LFR) type of concentrated solar energy (CSP). A linear variable differential transformer (LVDT) was coupled to the axis of the reflecting mirror to indicate its angular position during the period of operation. The position obtained through the LVDT is input from a control system that has been developed to compensate for the angular position of the reflecting mirror at times when there are external perturbations or problems in the mechanical positioning system. It was necessary to construct a low cost LVDT, as well as the mechanical structure of the reflector system and the instrumentation circuit. The matlab/simulink was used to simulate the electric and geometric models of the LVDT and the electronic circuit of instrumentation. Regarding the coupling of the sensor to the axis of the reflector mirror, it was done through a pulley. A simulation evaluation of the influence of the pulley radius on the error of the mirror position reading was performed for a same sensor accuracy value. The influence of the sensor's accuracy value on the inclination error of the reflector mirror was also checked. To determine the accuracy of the transducer in practice, a repeatability test was performed. Ten calibration curves were obtained and then the margin of error was calculated, with a confidence level of 99%. It was then found that a pulley having a radius of 8.5 cm would be sufficient to control the position of the mirror with a 0.21° error. The accuracy of the concentrator system was determined with the LVDT coupled to the structure, also using repeatability test. Ten calibration curves were obtained and the margin of error was determined, also with a confidence level of 99%. An evaluation of the best installation height of the receiver was also made to reduce the radiation losses. In addition, the relationship between the radiation losses and the horizontal installation distance of the reflecting mirrors was determined in relation to the receiver. In practice the maximum error in reading the angular position of the reflecting mirror was 0.27° , which makes it possible for 96.92% of the radiation reflected by the farthest mirror, and 100% of the radiation reflected by the other mirrors, to reach the receiver positioned at 3.47 m height.

Keywords: Concentrating solar power, Solar Tracker, Fresnel Linear Reflector, Linear Variable Differential Transformer, Position Sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Diagrama esquemático de um Refletor linear fresnel.	19
Figura 2:	(a) Concentrador secundário e tubo absorvedor. (b) Corte transversal do receptor.	20
Figura 3:	Configurações geométricas de espelho plano (a) e espelho curvado (b)	21
Figura 4:	Algumas aplicações da energia solar.	29
Figura 5:	Princípio de funcionamento. (a) Calha parabólica, (b) Torre solar, (c) Disco parabólico e (d) Refletor Fresnel linear	30
Figura 6:	Concentrador de calha parabólica	33
Figura 7:	Protótipo de refletor linear fresnel na Sicília, Itália	33
Figura 8:	Curva da equação do tempo ao longo do ano.	37
Figura 9:	Movimento Elíptico da terra	38
Figura 10:	Declinação solar.	39
Figura 11:	Curva da declinação Solar ao longo do ano.	40
Figura 12:	Curva do ângulo horário ao longo do dia.	40
Figura 13:	Ilustração dos ângulos de altitude solar, azimute e zênite	42
Figura 14:	Trajectoria de um raio solar refletido em uma superfície especular	43
Figura 15:	Ângulos associados ao espelho refletor para rastreamento no sentido Leste-Oeste	43
Figura 16:	Largura da faixa de radiação que incide sobre o receptor	44
Figura 17:	Perda de radiação devido ao erro de inclinação do espelho	45
Figura 18:	Sensor de posição acoplado ao espelho	48
Figura 19:	Constituição das partes de um LVDT	52
Figura 20:	Interação de fluxo para espaçamento pequeno e grande entre espiras.	55

Figura 21: Comparação da concentração das linhas de campo para núcleo de ar e núcleo de ferrite.	55
Figura 22: Bobinas com diferentes camadas.	56
Figura 23: Capacitâncias entre camadas e entre espiras, para uma bobina com várias camadas.	57
Figura 24: capacitância parasita entre espiras.	57
Figura 25: circuito equivalente de um indutor em frequências altas.	58
Figura 26: Tensão residual na posição central do núcleo do LVDT	60
Figura 27: Esquemático geométrico do LVDT	61
Figura 28: Fluxos lvdt	61
Figura 29: Circuito magnético equivalente do LVDT	62
Figura 30: Campo magnético induzido	62
Figura 31: Circuito elétrico equivalente do LVDT	65
Figura 32: Ensaio para determinação dos parâmetros R_p , L_p e $(M_1 - M_2)$	67
Figura 33: Ensaio para determinação dos parâmetros R_s e $(L_s - 2M_3)$	67
Figura 34: Funcionamento de um transdutor	68
Figura 35: Esquemático do demodulador presente no NE5521D	69
Figura 36: Funcionamento do bloco de demodulação na extremidade 1 do sensor	70
Figura 37: Funcionamento do bloco de demodulação na extremidade 2 do sensor	70
Figura 38: Etapas da pesquisa	74
Figura 39: Desenho da estrutura de suporte para o espelho refletor e sensor LVDT	75
Figura 40: Esboço do sensor LVDT construído	76
Figura 41: Usinagem do sensor	77
Figura 42: Sensor construído	77
Figura 43: Sensor envolvido com fita e núcleo	77
Figura 44: Núcleo posicionado no interior do LVDT	78

Figura 45:	Tubo de aço inox para blindagem e peças de encaixe e selagem	78
Figura 46:	Sensor com carcaça de inox	79
Figura 47:	Diagrama do circuito de condicionamento	82
Figura 48:	Circuito para ajuste de tensão para leitura pelo A/D	83
Figura 49:	Montagem para realização de experimentos com o transdutor	84
Figura 50:	Polinômios que representam a curva de calibração “tensão x posição” do LVDT	85
Figura 51:	Acoplamento do sensor a polia	86
Figura 52:	Análise realizada para diferentes erros de inclinação e altura do receptor	88
Figura 53:	Fluxograma do sistema de rastreamento	89
Figura 54:	Diagrama do sistema para rastreamento solar	90
Figura 55:	Driver para motor com ponte H L298N	91
Figura 56:	circuito que isola circuito de controle e de potência	91
Figura 57:	Caixa de redução. (a) Visão dos componentes, (b) Visão dos acoplamentos.	92
Figura 58:	Folga entre os dentes das engrenagens	93
Figura 59:	Inclinômetro digital DXL360S	94
Figura 60:	Inclinômetro digital DXL360S	95
Figura 61:	Espelho refletor e estrutura de suporte	96
Figura 62:	Caixa de redução. (a) Visão frontal, (b) Visão superior.	97
Figura 63:	Valores de Sync e dos terminais do secundário. Resultado resultado de simulação. Para este caso o núcleo foi posicionado em uma das extremidades do sensor	98
Figura 64:	Valores de Sync e dos terminais do secundário. Resultado experimental	98
Figura 65:	Valores nas saídas do demodulador e do filtro. Resultado de simulação	99
Figura 66:	Valores na entrada e saída do demodulador. Resultado experimental	99

Figura 67:	Tensões na saída do filtro e do demodulador. Resultado de simulação	100
Figura 68:	Tensões na saída do filtro e do demodulador. Resultado experimental	100
Figura 69:	Valores obtidos variando a temperatura no interior da carcaça do LVDT dentro de uma faixa específica	101
Figura 70:	Desvio padrão em relação ao polinômio médio, obtido no experimento apenas com o transdutor	102
Figura 71:	Relação do erro de inclinação ($\Delta\gamma$) com a distância entre sensor e haste do espelho (L_a) para diferentes valores de Δf , para $\gamma = 45^\circ$	103
Figura 72:	Relação do erro de inclinação ($\Delta\gamma$) com a distância entre sensor e haste do espelho (L_a) para o valor de Δf do sensor construído, para $\gamma = 45^\circ$	104
Figura 73:	Ângulo k ao longo do dia	105
Figura 74:	Ângulo de inclinação do espelho para rastreamento no sentido Leste-Oeste	106
Figura 75:	Desvio padrão em relação ao polinômio médio, obtido no experimento com o transdutor acoplado ao espelho refletor	107
Figura 76:	Perda de radiação do sistema para diferentes alturas de instalação do receptor	108
Figura 77:	Radiação solar perdida para um erro de inclinação dos espelhos de $0,5^\circ$	109
Figura 78:	Ângulo do espelho durante o processo de rastreamento.	110

LISTA DE TABELAS

1	Faixas de temperatura para diferentes processos industriais	28
2	Tipos de coletores solares térmicos	31
3	Eficiência e custo de instalação das principais tecnologias de concentração solar	32
4	Principais plantas LFR instaladas atualmente para produzir eletricidade	34
5	Definições de condições para caracterizar a velocidade do motor para o sistema de Hoyos et al. (2008)	50
6	Comparação das características de diferentes sensores	53
7	Sequência para meio passo no sentido horário	72
8	Sequência para meio passo no sentido anti-horário	73
9	Sequência para meio passo no sentido anti-horário	73
10	Configurações utilizadas em cada simulação da modelagem geométrica	80
11	Tensão de saída obtida para os diferentes casos utilizando a modelagem geométrica	80
12	Indutância na bobina primária no momento em que o núcleo está posicionado no centro do carretel	81
13	Largura da radiação refletida sobre o receptor para diferentes distâncias do espelho refletor (m) e receptor instalado a 3,47 m de altura	106
14	Valor de Δd para diferentes erros de inclinação do espelho (m) para um receptor instalado a 3,47 m de altura	108
15	Perda de radiação solar incidente (P_p) devido a $\Delta\gamma$ para um receptor instalado a 3,47 m de altura	109

LISTA DE SIGLAS

AST	Hora solar aparente (<i>Apparent Solar Time</i>).
CPV	Concentração fotovoltaica (<i>Concentrated Photo Voltaic</i>).
CSP	Energia solar concentrada - Concentrated solar Power (<i>Concentrated solar Power</i>).
DS	Horário de verão (<i>Daylight saving</i>).
ET	Equação do tempo.
HFC	Concentrador de receptor central (<i>Heliostat Field Collector</i>).
HTF	Fluido de Transferência de Calor (<i>Heat Transfer Fluid</i>).
LFR	Refletor Linear Fresnel (<i>Linear Fresnel reflector</i>).
LL	Longitude Local (<i>Local Longitude</i>).
LST	Hora local padrão (<i>Local Standard Time</i>).
LVDT	Transformador Diferencial Linear Variável (<i>Linear Variable Differential Transformer</i>).
PDR	Concentrador de disco parabólico (<i>Parabolic Dish Reflector</i>).
PTC	Concentrador cilíndrico parabólico (<i>Parabolic Trough Collector</i>).
SL	Longitude padrão (<i>Standard Longitude</i>).

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Dia do ano
α	Ângulo de altitude solar
z	Ângulo de azimute solar
δ	Ângulo de declinação solar
h	Ângulo horário
Φ	Ângulo zênite
L_s	Latitude Local
k	Ângulo entre um eixo paralelo à linha Leste-Oeste e os raios solares
γ	Ângulo de inclinação do espelho refletor
θ	Ângulo entre a superfície receptora e a linha de espelho
i	Ângulo de incidência solar
φ	Largura da faixa de radiação solar refletida pelo espelho refletor
ω	Largura do espelho refletor
γ_r	Ângulo de inclinação do espelho para os casos em que existe um erro de inclinação
θ_r	Ângulo entre a superfície receptora e a linha de espelho para os casos em que existe um erro de inclinação
d_2	Distância entre o centro da radiação incidente sobre o receptor e o espelho refletor quando existe erro de inclinação do espelho
A_{rec}	Altura do receptor
Δd	Desvio do foco da radiação, em centímetros, devido ao erro de inclinação do espelho
d_1	Distância entre o centro do receptor e o espelho refletor
Δd_{per}	Erro de deslocamento máximo permitido
L_{rec}	Largura do receptor
L_{prp}	Porção de radiação perdida
P_p	Porcentagem de radiação que incide fora do receptor
$\Delta\gamma$	Erro angular associado à medição feita pelo sensor
Δf	Erro de medição do deslocamento causado pelo sensor
L_a	Raio da polia utilizada para acoplar o LVDT ao eixo do espelho

h_1	Comprimento do enrolamento primário
h_2	Comprimento do enrolamento secundário
D	Diâmetro externo do cilindro formado pelos enrolamentos
d	Diâmetro do núcleo
t_1	Comprimento do núcleo que está inserido no enrolamento secundário 1
t_2	Comprimento do núcleo que está inserido no enrolamento secundário 2
δ_1	Parcela do secundário 1 em que o núcleo não está inserido
δ_2	Parcela do secundário 2 em que o núcleo não está inserido
R	Raio de fluxo efetivo
U_i	Tensão de entrada
I_p	Corrente no primário
R_p	Resistência do enrolamento primário
L_p	Indutância do enrolamento primário
M_1	Indutância mútua entre os enrolamentos, primário e secundário 1
M_2	Indutância mútua entre os enrolamentos, primário e secundário 2
I_s	Corrente no secundário
R_{s1}	Resistência do enrolamento secundário 1
R_{s2}	Resistência do enrolamento secundário 2
L_{s1}	Indutância do enrolamento secundário 1
L_{s2}	Indutância do enrolamento secundário 2
M_3	Indutância mútua entre os enrolamentos, secundário 1 e secundário 2
U_{in}	Tensão alternada que alimenta os 2 circuitos para obtenção das características elétricas do LVDT
I_{exc}	Corrente de excitação
S_{ync}	Tensão do primário após sofrer avanço de fase
γ_o	Ângulo atualizado do espelho obtido através do sensor LVDT
M_E	Margem de erro
σ	Desvio padrão
n_i	Número de amostras
I_C	Intervalo de confiança

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 MOTIVAÇÃO	19
1.1.1 Rastreador solar	21
1.2 OBJETIVO GERAL	24
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.4 CONTRIBUIÇÕES	25
1.5 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	25
2 REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA CONCENTRADA	27
2.1.1 Energia solar	27
2.1.2 Tecnologias de energia solar térmica concentrada	30
2.1.2.1 Refletor Linear Fresnel	32
2.1.3 Principais vantagens e desvantagens do Refletor Linear Fresnel	34
2.2 RASTREAMENTO SOLAR	36
2.2.1 Equação do Tempo e correção longitudinal	37
2.2.2 Ângulos Solares	39
2.2.2.1 Declinação solar e ângulo horário	39
2.2.2.2 Altitude solar e azimute	41
2.2.3 Ângulo entre um eixo paralelo à linha Leste-Oeste e os raios solares (k) e Ângulo de inclinação do espelho refletor	42
2.2.4 Erro de inclinação do espelho refletor	45
2.2.4.1 Fatores que contribuem para o erro de inclinação do espelho	47
2.2.5 Erro de medição do sensor de posição	48
2.3 SENSORES DE POSIÇÃO PARA REFLETOR LINEAR FRESNEL	49
2.4 TRANSFORMADOR DIFERENCIAL LINEAR VARIÁVEL (LVDT)	51
2.4.1 Critérios construtivos	52
2.4.1.1 Parte mecânica	53

2.4.1.2	Parte elétrica das bobinas	54
2.4.2	Materiais para confecção	58
2.4.3	Limitações do sensor	59
2.4.4	Modelagem do sensor LVDT através de seus dados geométricos	60
2.4.5	Modelagem elétrica do sensor LVDT	65
2.4.6	Condicionamento de sinal	68
2.5	SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DO ESPELHO REFLETOR	71
2.5.1	Modos de operação do motor de passo	72
3	MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.1	CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA DO SISTEMA REFLETOR ..	75
3.2	TRANSDUTOR LVDT	76
3.2.1	Construção do transformador diferencial	76
3.2.2	Determinação da relação do número de espiras	79
3.2.3	Circuito de condicionamento	81
3.2.3.1	Ajuste de tensão para leitura pelo conversor A/D	82
3.2.4	Estudo da influência da variação de temperatura na tensão de saída	83
3.2.5	Obtenção da precisão do transdutor construído	85
3.2.6	Acoplamento do LVDT ao eixo do espelho	86
3.3	DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ERRO DE MEDIÇÃO DO SEN- SOR NA INCLINAÇÃO DO ESPELHO	86
3.4	IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO DE RASTREAMENTO SOLAR	87
3.5	CONTROLE DO PROCESSO DE RASTREAMENTO SOLAR	89
3.5.1	Motor de passo e caixa redutora de velocidade	91
3.5.2	Experimentos com sistema completo	94
4	RESULTADOS	96
4.1	ESTRUTURA DO CONCENTRADOR SOLAR	96
4.2	ANÁLISE DO TRANSDUTOR	97
4.2.1	Condicionamento de sinal	97
4.2.1.1	Validação do circuito de condicionamento	98
4.2.2	Precisão do transdutor e testes variando a temperatura	100
4.3	RELAÇÃO ENTRE O ERRO DE MEDIÇÃO DO SENSOR E O ERRO DE INCLINAÇÃO DO ESPELHO	103

4.4 RASTREAMENTO SOLAR	105
4.4.1 Resposta de precisão dos testes com o sistema concentrador	106
4.4.2 Influência dos fatores altura do receptor e distância de instalação do espelho refletor na perda de radiação	107
4.5 CONTROLE DE RASTREAMENTO	110
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
5.1 CONCLUSÕES	111
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

A energia é um dos recursos primordiais para o desenvolvimento econômico, dos transportes, do ambiente, relações internacionais e estado. Os combustíveis fósseis fornecem a maior parte da energia primária mundial, porém geram impactos ao meio ambiente e contribuem para o aumento do aquecimento global, além disso, é possível que se esgotem no futuro. Dessa forma, o interesse mundial na geração de energias renováveis, que são inesgotáveis e limpas, é cada vez maior.

Dentre as fontes de energia existentes, quase todas são formas indiretas da solar, dentre elas, eólica, biomassa, hidráulica e energia dos oceanos. O Sol é a principal fonte de energia no planeta, responsável pela manutenção das várias formas de vida existentes, sendo um recurso praticamente inesgotável e constante. Com uma capacidade de geração disponível tão grande, a conversão da energia solar torna-se um tópico muito importante dentro do estudo das energias renováveis.

Uma das formas de se realizar esse processo é através da transformação em energia térmica utilizando-se concentradores solares. Os sistemas de energia térmica solar de concentração produzem calor ou eletricidade através da utilização de espelhos que concentram os raios do sol. Existem diferentes tipos de concentradores, porém todos funcionam com o mesmo princípio.

Tanto para conversão fotovoltaica quanto para térmica, a utilização de concentradores solares, com a finalidade de aumentar o fluxo de energia incidente, tem se mostrado eficaz, permitindo alcançar valores maiores de eficiência no processo de conversão. Porém, para que o sistema tenha um nível elevado de concentração os requisitos de precisão e a qualidade das superfícies refletoras devem ser altos.

A principal vantagem dos sistemas térmicos é o rendimento, que é superior ao sistema fotovoltaico e ao sistema de concentração fotovoltaica (CPV).

1.1 MOTIVAÇÃO

Dentre os tipos de concentradores solares a tecnologia de concentração Refletor Linear Fresnel - Linear Fresnel reflector (LFR), cujo esquema é mostrado na figura 1, é uma das mais promissoras, porém, ainda está em fase de consolidação (BENYAKHLEF *et al.*, 2016).

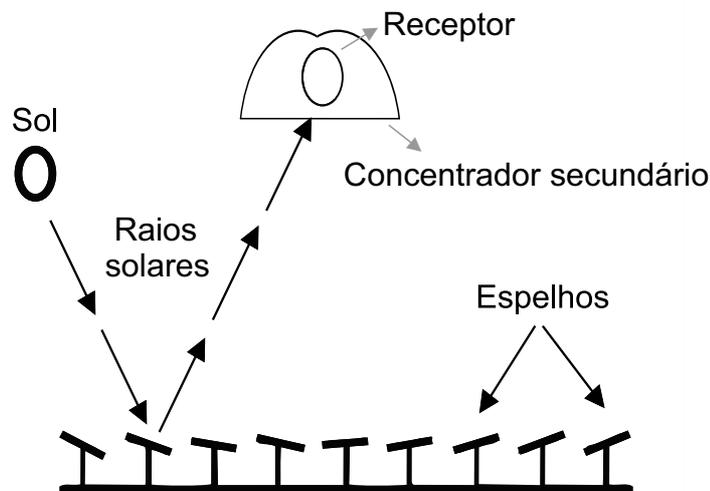


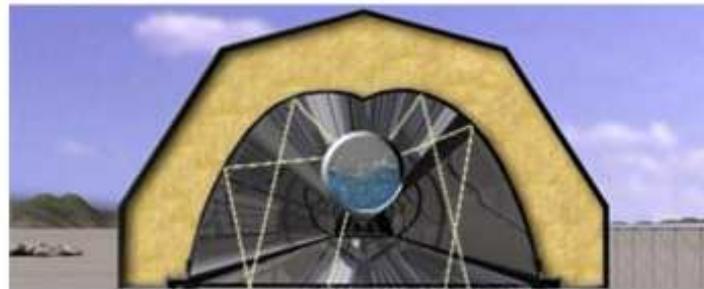
Figura 1: Diagrama esquemático de um Refletor linear fresnel.

Fonte: Adaptado de Barbón *et al.* (2016)

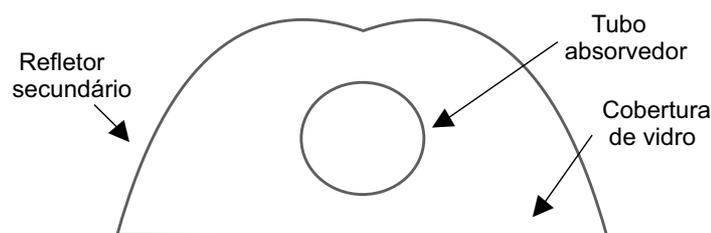
Em um campo de refletores Linear Fresnel filas de espelhos paralelas concentram a radiação solar em um receptor linear comum (SHARMA *et al.*, 2016). Um concentrador secundário, mostrado com detalhes na figura 2, pode ser adicionado sobre o receptor para aumentar a eficácia ao recolher a luz solar. Concentradores secundários são utilizados para concentrar a luz solar nas áreas pequenas do receptor. Eles asseguram a recolha e redirecionamento dos feixes solares na direção correta (FERNÁNDEZ-GARCÍA *et al.*, 2014). Porém, é necessário limitar a largura deste concentrador para minimizar a sombra gerada sobre o campo de espelhos (DAI *et al.*, 2012). Além disso, a temperatura máxima suportada pelo concentrador secundário é um fator limitante, em consequência da estabilidade do material utilizado (HEIMSATH *et al.*, 2014).

Um sistema com receptor grande aumenta a área de captação do LFR, porém, necessita de um forte apoio de metal, o que afeta os custos de fabricação. Além disso, gera maior sombreamento sobre o campo de espelhos refletores, dimi-

nuindo a eficiência do sistema. Outro fator que deve ser levado em consideração é a altura de instalação da estrutura absorvedora, em relação a linha de espelhos refletores. Essa altura influencia na eficiência óptica do sistema, devido a relação entre a radiação incidida e a inclinação dos espelhos, e no custo do equipamento.



(a)



(b)

Figura 2: (a) Concentrador secundário e tubo absorvedor. (b) Corte transversal do receptor.

Fonte: Adaptado de [Sharma et al. \(2016\)](#)

Os espelhos refletores empregados na tecnologia LFR são planos, originalmente. Contudo, quando utilizados desta forma a largura do seu foco não será menor que a largura do espelho, limitando sua concentração ([XIAO, 2012](#)). Por isso, estudos recentes propõem faixas de espelhos côncavos com curvatura estática, como mostrado na figura 3, baseados na deformação elástica da folha de vidro, introduzindo, assim, uma característica do Concentrador cilíndrico parabólico (PTC) ao sistema Linear Fresnel. Alcançando maior eficiência óptica e reduzindo custos ([BENYAKHLEF et al., 2016](#)).

Quanto maior a altura do receptor em relação ao espelho com curvatura, menor influencia terá a curvatura sobre a eficiência óptica, dessa forma, justifica-se sua utilização em sistemas em que os receptores são colocados mais próximos ao chão ([BENYAKHLEF et al., 2016](#)). Apesar da curvatura permitir que os espelhos tenham desempenho superior [Abbas et al. \(2013\)](#), para cada caso deve-se avaliar, a simpli-

cidade da construção, o custo do mecanismo de controle e a resistência à carga de vento (XIAO, 2012).

Considerando que todos os espelhos refletores são posicionados a distâncias distintas do receptor, diferentes curvaturas devem ser aplicadas a cada um, visando atingir maior eficiência no processo de concentração (GEA *et al.*, 2007).

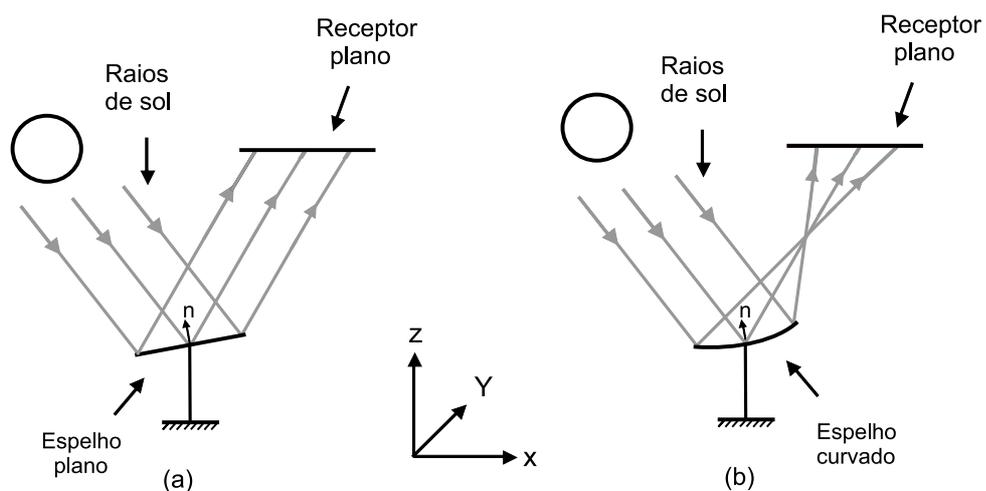


Figura 3: Configurações geométricas de espelho plano (a) e espelho curvado (b)

Fonte: Adaptado de Benyakhlef *et al.* (2016)

Para que o aproveitamento da radiação solar seja máxima os coletores solares precisam estar orientados corretamente em todos os momentos do dia. De acordo com Tapia (2011), em um sistema linear fresnel os espelhos podem ser ajustados de duas formas: a) No sentido Leste-Oeste, realizando o seguimento zenital do sol no sentido Norte-Sul; b) No sentido Norte-Sul, realizando o seguimento azimutal do sol no sentido Leste-Oeste. A primeira configuração apresenta baixa captação da radiação ao amanhecer e entardecer durante todo o ano, porém, ao meio-dia os níveis de radiação nas superfícies absorvedoras são altos. A forma mais utilizada é a segunda, que proporciona 70% de sua geração durante o verão. Este método de seguimento maximiza a coleta de energia anual (SPOLADORE *et al.*, 2011).

1.1.1 Rastreador solar

A implementação do processo de rastreamento solar mantém o coletor solar, tanto de um sistema fotovoltaico quanto de um sistema térmico, em uma posição ótima, possibilitando maior aproveitamento na coleta da radiação solar durante o dia

(SIDEK *et al.*, 2017). Os métodos de rastreamento para painéis fotovoltaicos são bem difundidos e vários já foram implementados na última década. Sumathi *et al.* (2017) traz uma revisão desses trabalhos, enquanto Sidek *et al.* (2017) apresenta outra proposta atual de sistema rastreador para painel solar. No entanto, ainda são poucos os trabalhos que propõem sistemas de rastreamento voltados para concentradores do tipo LFR. Alguns desses métodos são abordados na sequência.

Em seu trabalho Gea *et al.* (2012) descrevem a utilização de motores de passo e caixas redutoras de velocidade para mover os espelhos refletores. Um computador realiza o movimento dos espelhos através do controle central, que é conectado de forma individual a cada um dos espelhos, utilizando-se circuito eletrônico. O programa implementado utiliza equações que descrevem o movimento do sol durante o dia. Dessa forma, o controle é feito em malha aberta.

Sen *et al.* (2013) propõem um mecanismo de movimentação para os espelhos através da ligação de quatro barras, de forma que, o movimento de rotação fornecido para um tubo é transmitido para os outros, obtendo-se a igualdade de desvios de todos os tubos, e conseqüentemente, dos espelhos acoplados a eles. Um mecanismo de engrenagens faz com que o movimento transmitido a um único tubo seja transmitido igualmente a todos os outros. As engrenagens são rodadas a uma taxa de 15° por hora, através de um pequeno motor.

Em outro trabalho, Echazú *et al.* (2013) propõem para o seguimento solar um dispositivo eletromecânico com funcionamento síncrono. O sistema possui um redutor de velocidade, feito através de um trem de engrenagens de três etapas, e um motor de passo, que é controlado por um relógio eletrônico. O circuito para controle do motor é composto por três circuitos integrados; NE555, 4017 e ULN2003. O circuito NE555, após gerar um sinal periódico, o injeta na entrada do 4017. O ULN2003 amplifica os pulsos gerados, sua saída está conectada com as bobinas do motor de passo. Dados com relação a precisão e eficiência de funcionamento não são descritos, pois o sistema completo ainda não havia sido ensaiado.

Na região de Shangai na China, Lin *et al.* (2013) utilizam um sistema em que o giro dos motores de passo é controlado sem utilização de mecanismo de *feedback*. Um controlador de seguimento solar baseado em Unidade de Controle Microprogramado (MCU), o ATmega128 com chip temporizador real, foi utilizado para controlar os motores. A configuração possibilitou uma operação confiável e estável.

Não foi possível evitar erros mecânicos apenas pelo controlador, sendo assim, para minimizar estes efeitos foram instalados dois botões manuais na placa de circuito, para ajudar a seguir a posição dos espelhos.

[Almeida \(2013\)](#) demonstra os cálculos que utilizou para encontrar os ângulos de inclinação dos espelhos, porém, não implementa um sistema de seguimento automático e o faz de forma manual. Assim como [Cifuentes \(2013\)](#), que destacou o fato de o sistema manual, feito através de engrenagens, dificultar bastante a operação do concentrador solar.

Em Lima no Peru [Saettone \(2014\)](#) criou um experimento de refletor linear fresnel para destilação de água, o campo de espelhos foi instalado no sentido leste-oeste e o rastreamento solar foi feito no sentido norte-sul. Não foi utilizado um sistema de seguimento solar, devido a menor necessidade de variação do ângulo dos espelhos durante o tempo de operação para esse tipo de configuração, contudo, este método tem uma menor eficiência ao longo do ano se comparado com o rastreamento no sentido leste-oeste.

[Saravia et al. \(2014\)](#) também utilizaram motores de passo para mover os espelhos. O comando da frequência de giro foi feito por um microcontrolador ARM de 32 bits, e o movimento automatizado foi realizado através de programação do algoritmo e arquivos do tipo tabelas de dados. Não necessitando de um funcionário para fazer ajustes manuais durante o período diário de operação. Porém, concentradores secundários de 68,5 cm de largura foram utilizados para aumentar a eficiência de concentração do concentrador.

[Negreiros \(2015\)](#) desenvolveu um sensor para medir o ângulo de inclinação de um espelho refletor do tipo fresnel. Seu princípio de funcionamento é baseado no princípio do sensor de proximidade indutivo. A cada 30 segundos um motor DC modifica a posição do espelho para acompanhar o movimento do sol, utilizando como referência um algoritmo de rastreamento implementado e comparando com o ângulo lido pelo sensor. Utiliza-se um motor de corrente contínua para mover a linha de espelhos. O funcionamento do sistema é completamente autônomo, com erro máximo de $0,5^\circ$, que ocorre quando a inclinação do espelho refletor é maior que 20° . O erro médio, porém, foi de $0,063^\circ$.

Com base no exposto, este trabalho tem como objetivo contribuir para o estudo dos concentradores solares de sistemas térmicos do tipo refletor Linear Fresnel,

através do projeto de um rastreador baseado na realimentação da posição do refletor por meio de um Transformador Diferencial Linear Variável - *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT). Um protótipo de sistema rastreador para um concentrador LFR foi desenvolvido para verificação da precisão do rastreamento e a resposta do sistema de controle quando o sistema estiver sujeito a perturbações causadas por fatores externos (rajadas de vento, chuva, etc.) ou problemas mecânicos (passo do motor e desgaste das engrenagens).

O LVDT foi utilizado para monitorar o ângulo de inclinação do espelho refletor de um concentrador solar linear fresnel. Operando segundo o princípio de um transformador, o sensor é composto por dois enrolamentos secundários e um primário, além de um núcleo ferromagnético que é deslocado internamente ao longo da estrutura. No momento em que o núcleo é posicionado em uma das extremidades do sensor, a tensão é máxima em um dos enrolamentos secundários e mínima no outro. Quando está no meio, a tensão é igual nos dois (ATHAYDE, 2015). A tensão medida na saída do LVDT é dada pela diferença entre as tensões nas bobinas secundárias (MISRA *et al.*, 2014). Sendo assim, a variação da tensão de saída é utilizada para determinar a posição do núcleo (RAJ *et al.*, 2014). Se o núcleo estiver acoplado ao espelho é possível determinar seu ângulo de inclinação, em qualquer momento do dia.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um protótipo de concentrador solar do tipo refletor linear fresnel, utilizando o transformador diferencial linear variável, como sensor de posição, e um sistema de controle, que ajusta a posição do espelho refletor ao longo do dia buscando otimizar o processo de captação da radiação solar.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Buscando-se alcançar o objetivo geral, teve-se como objetivos específicos:

- Determinar, através de simulação, a influência do erro de medição do sensor na inclinação do espelho;
- Implementar simulação do processo de rastreamento solar, para verificar perda de energia em um concentrador solar do tipo refletor fresnel linear, devido ao erro de inclinação do espelho refletor;

- Projetar e construir: estrutura mecânica de suporte para espelho refletor, LVDT e motor; transdutor e circuito de condicionamento, validando experimentalmente seu funcionamento;
- Implementar sistema de controle para realização de testes experimentais de rastreamento solar, e realizar ensaios de variação de temperatura, precisão e comportamento quando submetido a perturbações com o protótipo de LVDT e concentrador solar.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições desse trabalho são:

- Determinar, através de modelagem matemática, a porcentagem de radiação que deixa de incidir sobre o receptor, devido ao erro de inclinação do espelho refletor, para um concentrador solar do tipo refletor fresnel linear;
- Relacionar imprecisão de leitura do sensor de posição com erro de inclinação do espelho refletor;
- Determinar a altura ideal de instalação do receptor, para dimensões específicas do concentrador, visando maximizar a quantidade de radiação captada;
- Utilização de um transformador diferencial linear variável como sensor de posição em um concentrador solar do tipo refletor fresnel linear.

1.5 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos, iniciando pela introdução.

O segundo capítulo é composto pelo referencial teórico dos sistemas de energia solar térmica concentrada, equações de rastreamento solar, sistemas rastreadores implementados anteriormente e teoria sobre LVDT.

O capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados para obtenção dos resultados desta dissertação.

O capítulo 4 é composto pelos resultados de rastreamento solar, erro de medição de um sensor de deslocamento, resultados de simulação e experimentais do LVDT e do concentrador.

O capítulo 5 é composto pelas conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA SOLAR TÉRMICA CONCENTRADA

Nesta seção é feita uma abordagem da energia solar, sua aplicação em sistemas térmicos, as principais tecnologias térmicas de concentração utilizadas atualmente e as principais vantagens e desvantagens da LFR em relação as demais.

2.1.1 Energia solar

O sol é a principal fonte de energia do planeta, responsável pela manutenção das formas de vida aqui existentes. A energia resultante das reações de fusão dos núcleos dos átomos de hidrogênio é radiada a uma velocidade de 300.000 km/s, e atinge a atmosfera da terra, podendo ser refletida ou absorvida por seus diversos componentes (MIRANDA, 2008). A energia fornecida pelo sol anualmente para a atmosfera da terra é algo em torno de 10000 vezes o consumo mundial de energia no mesmo período (MIRANDA, 2008).

O Brasil possui localização privilegiada em termos de irradiação solar incidente. Até mesmo as regiões menos favorecidas do país apresentam condições economicamente viáveis de utilização deste recurso energético. O litoral norte de Santa Catarina, por exemplo, que apresenta a menor taxa de irradiação solar global do Brasil, equivale a mais de quatro vezes o valor incidente na Alemanha, país líder no aproveitamento desta energia (BANDEIRA, 2012). Segundo Penafiel (2011) o Brasil possui uma área de 97.700,93 Km^2 adequada para as tecnologias de energia solar concentrada (CSP), onde 3664 TWh/ano poderiam ser gerados.

O maior aproveitamento da energia solar tem sido para o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. Porém, pesquisas vem mostrando que o grande potencial dos sistemas térmicos solares pode ser aproveitado também nas indústrias. Nos países industrializados o calor industrial é responsável pela demanda de 15% da energia consumida e na maior parte dessas atividades a demanda de calor é feita a baixas e médias temperaturas (abaixo de 250°) (CRUZ, 2012). A

tabela 1 mostra algumas das atividades industriais dentro dessa faixa.

Tabela 1: Faixas de temperatura para diferentes processos industriais

Industria	Processo	Temperatura (°C)
Laticínio	Pressurização	60-80
	Esterilização	100-120
	Secagem	120-180
	Concentrados	60-80
	Água de alimentação da caldeira	60-90
Alimentos enlatados	Esterilização	110-120
	Pasteurização	60-80
	Cozimento	60-90
	Branqueamento	60-90
Têxtil	Branqueamento, tingimento	60-90
	Secagem, desengorduramento	100-130
	Tingimento	70-90
	Fixação	160-180
Papel	Cozinhando, secando	60-80
	Água de alimentação da caldeira	60-90
	Branqueamento	130-150
Química	Sabonetes	200-260
	Borracha sintética	150-200
	Calor de processamento	120-180
	Água de pré-aquecimento	60-90
Carne	Lavagem, esterilização	60-90
	Cozimento	90-100
Bebidas	Lavagem, esterilização	60-80
	Pasteurização	60-70
Farinhas e subprodutos	Esterilização	60-80
Subprodutos da madeira	Vigas de termodifusão	80-100
	Secagem	60-100
	Água de pré-aquecimento	60-90
	Preparação de polpa	60-90
Tijolos e blocos	Tratamento	60-140
	Preparação	120-140
	Destilação	140-150
Plásticos	Separação	200-220
	Extensão	140-160
	Secagem	180-200
	Misturando	120-140

Fonte: Adaptado de Kalogirou (2003)

De acordo com Souza e Cavalcante (2017) existem outros benefícios associados ao aumento na utilização de sistemas CSP. A tecnologia poderia ser inserida em políticas públicas, sendo implantada em regiões semi-áridas, visando reduzir a pobreza local, através dos postos de trabalhos gerados, direta e indiretamente, ligados a construção e manutenção dessas centrais.

Pode-se verificar na figura 4 algumas aplicações da energia solar. Aqui

será abordado apenas acerca dos coletores solares térmicos, foco desta pesquisa. Verifica-se que os coletores são divididos em duas categorias: sem concentração, que são mais utilizados em aplicações que exigem baixas temperaturas (30 °C a 80 °C), apesar desses coletores também atingirem a faixa de temperaturas médias (60 °C a 300 °C); e com concentração, para aplicações a temperaturas médias e altas (300 °C a 2000 °C).

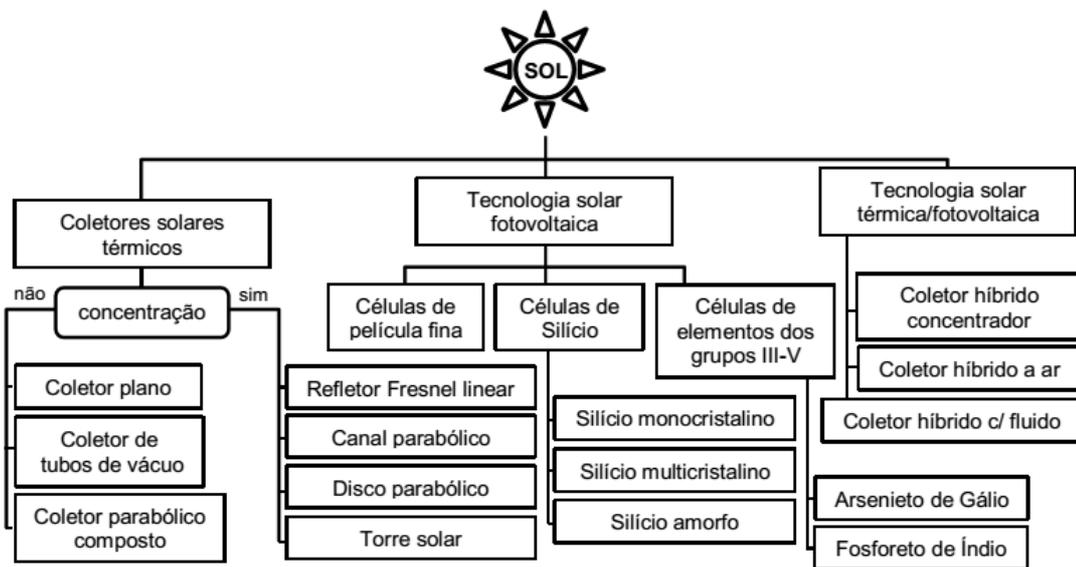


Figura 4: Algumas aplicações da energia solar.

Fonte: Almeida (2013)

As tecnologias de concentração mais utilizadas são: cilíndrico parabólico ou canal parabólico, disco parabólico - parabolic dish reflector (PDR), concentrador de receptor central ou torre solar - Heliostat field collector (HFC) e refletor linear fresnel (BARLEV *et al.*, 2011; ELMAANAOU; SAIFAOU, 2014; ZHU, 2017). A figura 5 mostra a ilustração dessas tecnologias.

Uma das maiores vantagens desses sistemas, em relação a outras tecnologias que geram eletricidade diretamente, é o fato de poder armazenar, a baixo custo, o calor em um acumulador térmico. Em outros sistemas, como fotovoltaica e eólica, a acumulação de eletricidade direta se dá a alto custo (SARAVIA *et al.*, 2014).

Na próxima seção será abordado com mais detalhes as características dos diferentes tipos de concentradores solares.

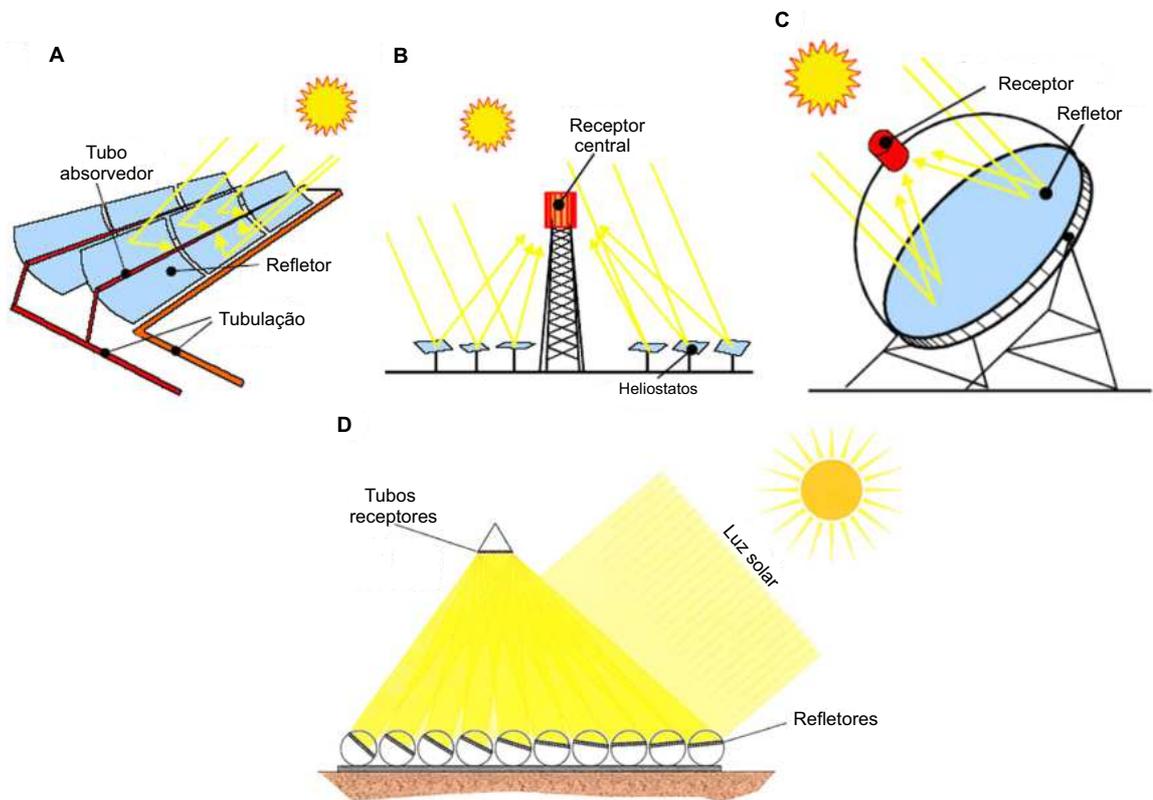


Figura 5: Princípio de funcionamento. (a) Calha parabólica, (b) Torre solar, (c) Disco parabólico e (d) Refletor Fresnel linear

Fonte: Adaptado de [Purohit e Purohit \(2010\)](#)

2.1.2 Tecnologias de energia solar térmica concentrada

A Tabela 2 mostra as principais características dos diferentes sistemas coletores solares térmicos. Para as tecnologias que possuem concentração, verifica-se que todas atingem temperaturas acima de $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, podendo chegar a $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ no caso do HFC. Porém possuem suas próprias características quanto a forma de focar a radiação solar e de realizar o rastreamento solar. A radiação pode ser concentrada em um ponto ou uma linha, dependendo da tecnologia utilizada, e o rastreamento pode ser feito em um ou dois eixos. Para todos os coletores a intensidade de concentração obtida é diretamente proporcional ao fator de concentração do sistema ([GHARBI et al., 2011](#)).

Verifica-se que o sistema de posicionamento dos coletores em relação ao sol se dá de três formas: a) Estacionário, no qual o coletor não faz o rastreamento solar, permanecendo imóvel durante o período de funcionamento; b) Seguidor de

um eixo, em que o espelho refletor segue o movimento do sol em um eixo. É feita a concentração da radiação solar em um receptor que possui no mínimo o comprimento do espelho refletor; c) Seguimento em dois eixos, em que o espelho refletor segue o movimento do sol em dois eixos. Neste método a radiação solar é concentrada em apenas um ponto, o que reduz a área de perda do receptor e aumenta a relação de concentração do concentrador. Para o primeiro método citado a relação de concentração é baixa, e a temperatura máxima que alcança é inferior aos demais. O seguimento em um eixo possui uma relação de concentração muito maior que o estacionário, além de atingir temperaturas mais elevadas. Os sistemas com seguimento em dois eixos são os que conseguem atingir temperaturas mais elevadas, devido ao alto nível de concentração que atingem.

Tabela 2: Tipos de coletores solares térmicos

Movimento	Tipo de coletor	Tipo de concentração	Relação de concentração	Intervalo de temperatura (°C)
Estacionário	Coletor de placa plana (FPC)	Plano	1	30–80
	Coletor de tubo a vácuo (ETC)	Plano	1	50–200
	Coletor parabólico composto (CPC)	Tubular	1–5	60–240
Seguidor de um eixo	Refletor linear fresnel (LFR)	Tubular	10–40	60–250
	Coletor cilíndrico parabólico (PTC)	Tubular	15–45	60–300
	Coletor de calha cilíndrica (CTC)	Tubular	10–50	60–300
Seguidor de dois eixos	Concentrador de disco parabólico (PDR)	Pontual	100–1000	100–500
	Concentrador de receptor central (HFC)	Pontual	100–1500	150–2000

Fonte: Adaptado de [Kalogirou \(2004\)](#)

Mesmo atingindo temperaturas inferiores aos sistemas com seguimento em dois eixos, os concentradores solares do tipo fresnel se caracterizam com uma das tecnologias mais promissoras, considerando que seu potencial atual ainda está longe dos limites teóricos que podem ser alcançados para o seu fator de concentração ([GUERREIRO et al., 2015](#)). Além disso, diversas aplicações requerem temperaturas abaixo do valor máximo que este concentrador consegue atingir atualmente.

A tabela 3 mostra a eficiência e custo de implantação das principais tecnologias de concentração. O concentrador fresnel possui uma boa relação “eficiência líquida x custo” e possui potencial para melhorar ainda mais, por isso a importância de investir em mais pesquisas voltadas para estes sistemas.

Na sequência será abordado um breve histórico desse sistema concentrador, assim como, suas características, principais plantas que existem atualmente e comparação com outros sistemas concentradores.

Tabela 3: Eficiência e custo de instalação das principais tecnologias de concentração solar

Características	Cilíndrico Parabólico	Torre Central	Disco Parabólico	Linear Fresnel
Potência (W)	15-200M	15-150M	3-25k	15-200M
Eficiência máxima(%)	20	23	30	18
Eficiência líquida anual(%)	11-16	7-20	12-25	12
Custo por W instalado (€/W)	4-6	4-6	9-11	3-4

Fonte: Adaptado de [Negreiros \(2015\)](#)

2.1.2.1 Refletor Linear Fresnel

A tecnologia Fresnel Linear, até pouco tempo atrás, nem sequer era reconhecida como uma tecnologia CSP, já que foi a única que não foi construída experimentalmente na década de 70, durante as crises do petróleo ([FORD, 2008](#)).

Impulsionada pelas crescentes atividades em energia solar concentrada nos últimos anos, os sistemas concentradores solar linear fresnel foram desenvolvidos como uma alternativa técnica para sistemas de coletores de calha parabólica. Os sistemas LFR foram concebidos para aplicações a temperaturas mais baixas, porém, os desenvolvimentos recentes mostram que ambos os sistemas coletores podem ser utilizados para os mesmos processos termodinâmicos ([SCHENK et al., 2014](#)). O refletor linear fresnel, porém, se mostra como uma alternativa consideravelmente mais econômica e com relação custo-benefício bastante interessante, quando comparado com outros sistemas de concentração solar, por este motivo é mais estudado a cada dia ([CANAVARRO, 2010](#)).

A concentração solar por meio dos coletores lineares fresnel se baseia no mesmo princípio de geração direta de vapor dos coletores cilíndrico parabólicos. Espelhos planos ou ligeiramente curvados refletem a radiação solar para uma linha absorvedora, onde encontra-se o líquido para ser convertido em vapor, através do aquecimento a altas temperaturas. Este vapor pode ser utilizado diretamente ou ser direcionado para turbinas e produzir eletricidade. A diferença entre os dois sistemas de concentração está na forma dos espelhos, como pode ser visto nas figuras [6](#) e [7](#). En-

quanto um sistema é formado por vários espelhos planos o outro é formado por um único espelho parabólico (TAPIA, 2011).



Figura 6: Concentrador de calha parabólica

Fonte: [ENERGIA HELIOTÉRMICA \(2015\)](#)



Figura 7: Protótipo de refletor linear fresnel na Sicília, Itália

Fonte: [Zhu et al. \(2014\)](#)

A Tabela 4 mostra os dados das plantas comerciais existentes e também de alguns protótipos. Verifica-se que existem três plantas LFR comerciais para geração

de energia: Kimberlina, na Califórnia (EUA); Puerto Errado 2, na Espanha e Solar Boiler for Liddell Power Station, na Austrália. Verifica-se ainda que existem quatro protótipos: Fresdemo, CNIM e Augustin Fresnel 1, na França; e Puerto Errado 1, na Espanha. Todas as plantas citadas utilizam água-vapor como fluido de transferência de calor - Heat transfer fluid (HTF). Outros fluidos, tais como, óleo, sal fundido e ar comprimido estão sendo analisados em outros protótipos. Atualmente é difícil avaliar qual a melhor opção, a vantagem de água-vapor está associada ao armazenamento e a controlabilidade em condições transitórias (MONTES *et al.*, 2014).

Tabela 4: Principais plantas LFR instaladas atualmente para produzir eletricidade

Nome da planta	Tipo de projeto	Potência	Receptor	HTF
Kimberlina Solar Thermal Power Plant (Califórnia, USA)	Comercial	5 MWe	Receptor multi-tubo, sem concentrador secundário, não-evacuado	Água-vapor
Puerto Errado 1 (Murcia, Espanha)	Protótipo	1.4 MWe	Absorvedor de tubo único com concentrador secundário, não-evacuado	Água-vapor
Puerto Errado 2 (Murcia, Espanha)	Comercial	30 MWe	Absorvedor de tubo único com concentrador secundário, não-evacuado	Água-vapor
Fresdemo (Almeria, Espanha)	Protótipo	Não especificado	absorvedor de tubo único com concentrador secundário, não-evacuado	Água-vapor
CNIM (Seyne-surmer, França)	Protótipo	Não especificado	Não especificado	Água-vapor
Augustin Fresnel 1 (França)	Protótipo	0.25 MWe	Absorvedor de tubo único com concentrador secundário, não-evacuado	Água-vapor
Solar boiler for Liddell power station (Austrália)	Comercial	0.25 MWth	Absorvedor de tubo único com concentrador secundário, não-evacuado	Água-vapor

Fonte: Adaptado de Montes *et al.* (2014)

Na sequência serão descritas as vantagens e desvantagens dos sistemas LFR em relação a outros sistemas de concentração solar.

2.1.3 Principais vantagens e desvantagens do Refletor Linear Fresnel

O refletor linear fresnel utiliza tecnologia de fácil obtenção, sendo possível utilizar materiais locais, facilitando sua instalação em países pouco industrializados. O rastreamento é feito em um só eixo, simplificando a modelagem e a implementação do sistema de seguimento. Para locais com baixa latitude e para horas próximas ao meio dia a eficiência é alta. Porém, por ser uma tecnologia mais nova ainda a poucas usinas comerciais (GEA *et al.*, 2012).

Cruz (2012) cita o fato de o sistema LFR ser mais rentável que os outros

sistemas térmicos. [Velázquez et al. \(2010\)](#) reforça, dizendo que o interesse nessa tecnologia, entre outros motivos, se deve à construção fácil, utilização de refletor pequeno e baixo custo estrutural. O tubo absorvedor também traz vantagens. Não é acoplado ao espelho refletor e se mantém fixo acima dos espelhos ([MILLS; MORRISON, 2000](#)). Isso facilita sua implementação e diminui os custos com estruturas de suporte.

Pelo fato de ser composta por espelhos planos ou pouco curvados, esta tecnologia tem vantagem em relação a sistemas que utilizam grandes espelhos curvos ([TAPIA, 2011](#)). Além do custo dos espelhos planos ser menor eles são colocados próximos ao chão, esse fator somado ao tamanho e formato dos espelhos faz com que as cargas de vento sejam reduzidas e o acesso às partes mecânicas móveis do sistema é facilitado ([SPOLADORE et al., 2011](#)). Propiciando que a estrutura de suporte seja mais simples, barata e menor ([FORD, 2008](#)), tenham menor consumo de energia ([LANCEREAU et al., 2015](#)), e o custo da manutenção e operação sejam reduzidos ([HABERLE et al., 2002](#)). O sistema fresnel possibilita ainda a facilidade na limpeza dos espelhos em relação a outras tecnologias ([GUERREIRO et al., 2015](#)). É importante considerar ainda que o dinheiro investido para fabricação e manutenção da planta é menor ([GRENA; TARQUINI, 2011](#)).

No entanto, com refletores linear Fresnel a qualidade óptica e eficiência térmica é menor, por causa de uma maior influência do ângulo de incidência e do fator de cosseno ([GHARBI et al., 2011](#)). Se for comparado com o sistema de concentrador de receptor central, por exemplo, verifica-se que o fator de concentração do sistema de concentração linear fresnel é mais baixo, e que pelo fato de o rastreamento solar ser em um eixo, a luz incidente é menos eficientemente explorada. Além disso, um receptor linear tem maiores perdas de calor do que um receptor central.

Comparando-se o LFR com o concentrador cilíndrico parabólico verifica-se a existência de três diferenças principais: Em primeiro lugar, sabe-se que a fabricação de uma superfície reflexiva com geometria parabólica é mais cara do que a fabricação mais plana; Em segundo lugar, para suportar as superfícies parabólicas são necessárias grandes estruturas móveis, ao contrário dos exigidos por superfícies planas, e por último, a superfície receptora do concentrador linear fresnel é mantida fixa, já no sistema de calha parabólica é móvel, dessa forma, há uma maior perda de pressão ([VELÁZQUEZ et al., 2010](#) apud [SAETTONE, 2014](#)).

Outro fator importante é que os sistemas LFR utilizam menos espaço de-

vido ao tamanho dos espelhos, que propiciam um melhor aproveitamento da área disponível (MORIN *et al.*, 2012). De acordo com ADARME-MEJÍA e Irizarry-Rivera (2015) o LFR utiliza aproximadamente 50% menos de área por kW em comparação com a tecnologia de calha parabólica.

Com relação ao rastreamento solar, as duas tecnologias fazem seguimento em um eixo, porém, nos concentradores cilíndrico parabólicos o receptor se move junto com o campo de espelhos, dessa forma, quando o espelho estiver voltado para o sol, os raios incidirão sobre o receptor. No caso do refletor fresnel, o receptor é fixo. Sendo assim, o ângulo em que o espelho refletor deve ter, para que a radiação seja absorvida, não depende apenas da posição do sol, mas também da altura da torre do receptor e da distância entre espelho refletor e torre do receptor. A próxima seção traz a modelagem necessária para definir o posicionamento do espelho refletor de um concentrador fresnel.

2.2 RASTREAMENTO SOLAR

Para projetar a instalação de um sistema térmico é importante levar em consideração a latitude do lugar, os dias do ano, hora do dia, comprimento e largura do refletor, espaçamento entre filas de refletores adjacentes, número de refletores, altura do receptor, dimensões do receptor e propriedades do material afetam as perdas de energia (SHARMA *et al.*, 2016). Dessa forma, o seguimento solar deve ser feito de forma precisa, levando em consideração o local da instalação, as características e dimensões do concentrador solar utilizado.

Para realização dos cálculos de rastreamento solar a hora solar aparente - Apparent Solar Time (AST) deve ser utilizada para expressar a hora do dia. A hora solar aparente é baseada no movimento angular aparente do sol no céu. Dessa forma, a hora que o sol atravessa o meridiano do observador caracteriza o meio-dia solar local. Geralmente não coincide com o meio-dia do relógio da localidade. Para converter a hora local padrão - Local Standard Time (LST) em hora solar aparente aplica-se duas correções, equação do tempo e correção longitudinal (DUFFIE; BECKMAN, 1991).

2.2.1 Equação do Tempo e correção longitudinal

A velocidade orbital da terra varia ao longo do ano, fazendo com que a hora solar aparente varie ligeiramente do tempo médio mantido por um relógio trabalhando a uma taxa uniforme. A variação é chamada de equação do tempo (ET) e de acordo com [Kalogirou \(2009\)](#) é definida por:

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

para um dia qualquer do ano N , em que:

$$B = (N - 81)\frac{360}{364}. \quad (2)$$

O gráfico que descreve a variação da equação do tempo ao longo do ano é mostrado na figura [8](#).

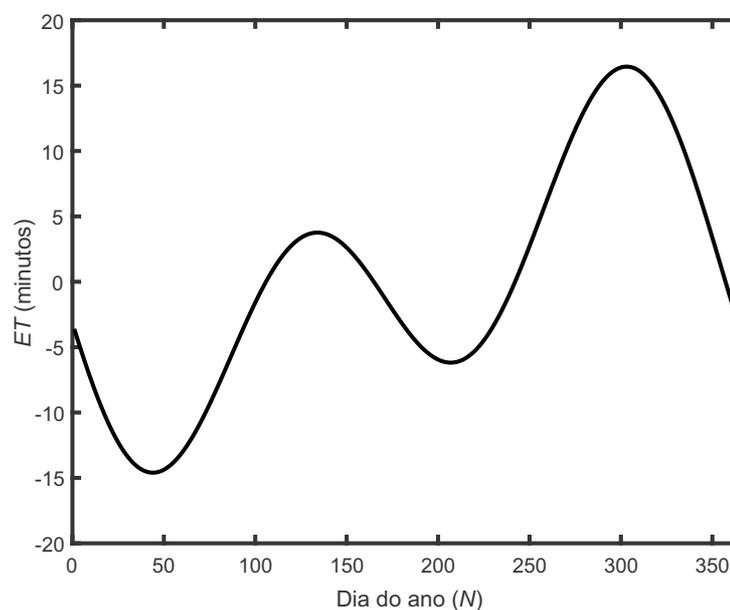


Figura 8: Curva da equação do tempo ao longo do ano.

A Equação do tempo é originada devido a variação do comprimento do dia, ou seja, o tempo requerido para que a terra complete uma volta em torno do seu próprio eixo com relação ao sol não é uniforme ao longo do ano ([KALOGIROU, 2009](#)). Sabe-se que devido à elipticidade da órbita, a Terra está mais próxima do sol em 3 de janeiro e mais afastada do sol em 4 de julho, como pode ser visto na figura [9](#). Portanto a velocidade de sua órbita é mais lenta que a média para metade do ano (de abril a

setembro) e é mais rápida na outra metade (de outubro a março).

De acordo com [Duffie e Beckman \(1991\)](#), a correção longitudinal tem como função eliminar o erro de longitude do sistema em estudo. Sabendo que o sol percorre 1° a cada 4 minutos, pode-se fazer o ajuste da longitude utilizando-se a longitude padrão - Standard Longitude (SL) da região e a longitude local - Local Longitude (LL):

$$4(SL - LL). \quad (3)$$

Esta correção é utilizada para o cálculo da hora solar aparente, que é definida por:

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

onde (DS) representa o horário de verão - daylight saving, acrescentando-se ou não 60 minutos dependendo da época do ano e da região. O sinal negativo (-) é atribuído às regiões localizadas a leste do meridiano de Greenwich e o sinal positivo (+) para regiões localizadas a oeste [Duffie e Beckman \(1991\)](#).

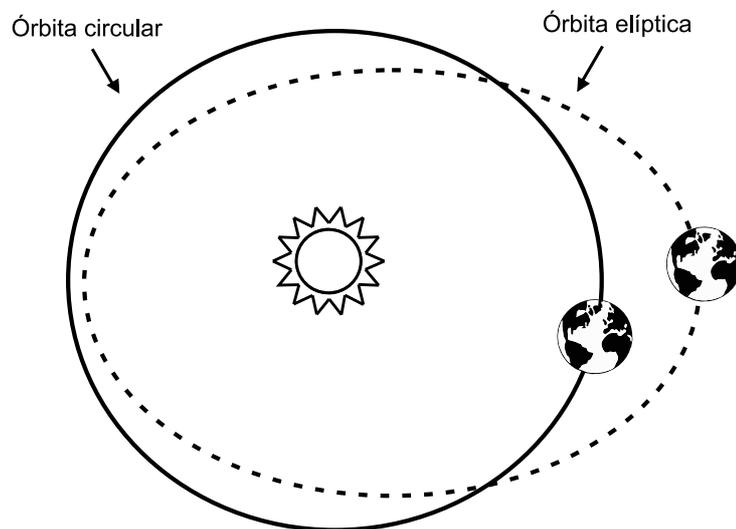


Figura 9: Movimento Elíptico da terra

Fonte: Adaptado de [Reboita et al. \(2015\)](#)

A próxima subseção aborda os ângulos solares necessários para realização do processo de rastreamento solar.

2.2.2 Ângulos Solares

Apesar dos movimentos relativos do sol e da terra não serem simples eles são sistemáticos, tornando-se previsíveis. Dessa forma a posição do sol pode ser determinada através da utilização de dois ângulos astronômicos, a altitude solar (α) e o azimute solar (z). Porém para que isso seja possível os valores de declinação solar (δ) e ângulo horário (h) devem ser calculados com antecedência, pois seus valores são requeridos nas equações [Duffie e Beckman \(1991\)](#).

2.2.2.1 Declinação solar e ângulo horário

A declinação solar pode ser descrita como o ângulo entre a linha que vai do centro da terra ao centro do sol e a projeção sobre o plano equatorial ([ALMEIDA, 2013](#)). A declinação, em graus, é definida por:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right]. \quad (5)$$

A variação angular da declinação durante o ano vai de $-23^{\circ}27'$ a $23^{\circ}27'$, como é mostrado na figura [10](#). A figura [11](#) mostra a curva de variação da declinação solar durante o ano.

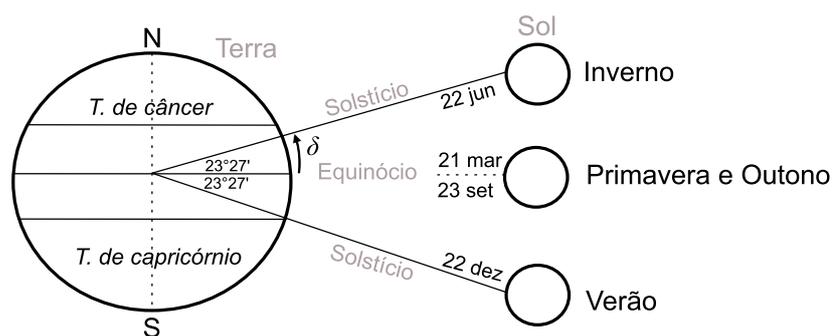


Figura 10: Declinação solar.

O Ângulo Horário (h) de um astro é o ângulo entre o círculo horário deste astro e o meridiano astronômico do observador ([SANTIAGO; SALVIANO, 2005](#)). Dessa forma, o ângulo horário é igual a 0° no momento do meio-dia solar. Sabendo que a cada hora o sol percorre 15° , equivalente a $(360^{\circ}/24h)$, o ângulo horário pode ser definido através da hora solar aparente ([KALOGIROU, 2009](#)). Então:

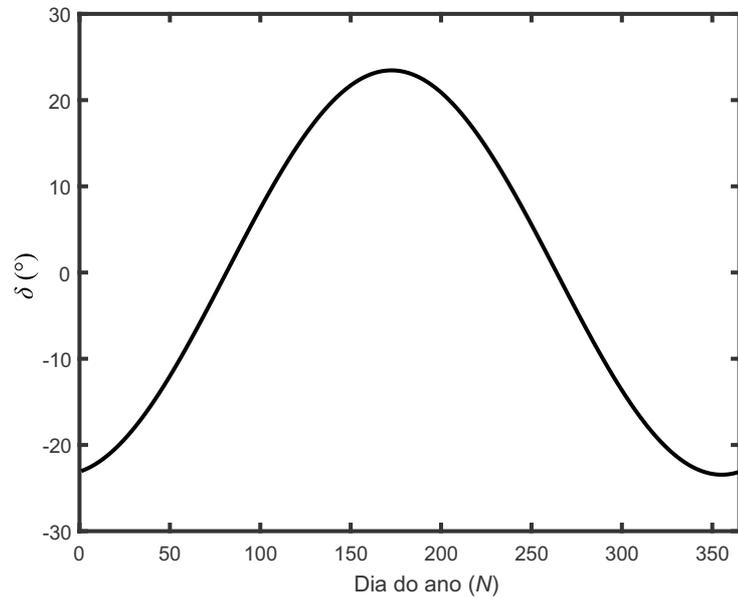


Figura 11: Curva da declinação Solar ao longo do ano.

$$h = (AST - 12)15. \quad (6)$$

A figura 12 mostra a curva de h durante o dia, para um determinado dia do ano, das 09:00 às 16:00 horas.

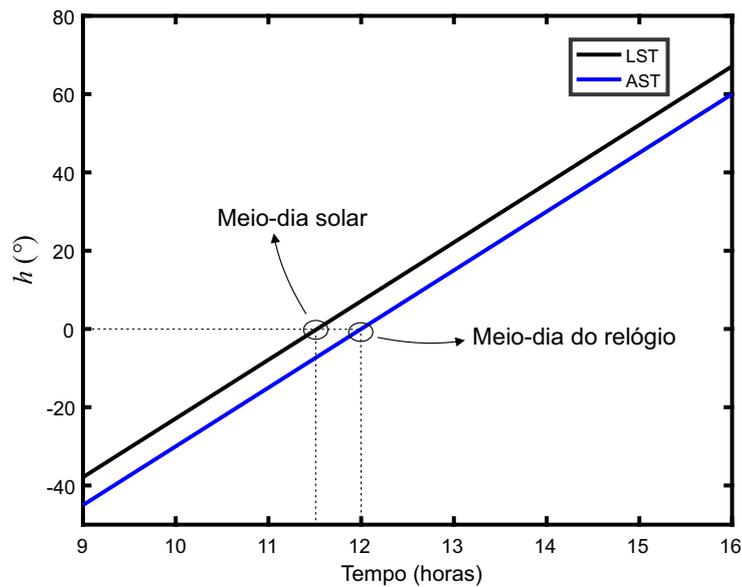


Figura 12: Curva do ângulo horário ao longo do dia.

Ao meio-dia solar $AST = 12$ e $h = 0$. Pelo fato da hora solar aparente não

coincidir com a hora do relógio (hora local padrão), o meio-dia solar não ocorrerá ao meio-dia do relógio.

2.2.2.2 Altitude solar e azimute

O ângulo de altitude solar é definido por [Duffie e Beckman \(1991\)](#) como o ângulo entre a linha que vai do centro da terra ao centro do sol e a projeção sobre a horizontal, dessa forma, também pode ser definido como o complemento do ângulo zênite (Φ).

Considerando a latitude local (L_s) como o ângulo entre a normal à superfície de referência e o plano do equador, e definindo que valores ao sul do equador são negativos e ao norte são positivos, a expressão que define o ângulo de altitude solar é expressa por [Duffie e Beckman \(1991\)](#):

$$\alpha = \arcsen[\sen(L_s)\sen(\delta) + \cos(L_s)\cos(\delta)\cos(h)]. \quad (7)$$

O ângulo de azimute solar é o ângulo medido no sentido horário, que a projeção do sol faz com a direção norte ou sul. Para os casos em que $\cos(h) > \tan(\delta)/\tan(L_s)$ o zênite é expresso por [Kalogirou \(2009\)](#) como:

$$z = \arcsen \left[\frac{\cos(\delta)\sen(h)}{\cos(\alpha)} \right]. \quad (8)$$

Para os demais casos, para as horas da manhã tem-se:

$$z = -\pi + \left| \arcsen \left[\frac{\cos(\delta)\sen(h)}{\cos(\alpha)} \right] \right|, \quad (9)$$

e para às horas da tarde:

$$z = \pi - \arcsen \left[\frac{\cos(\delta)\sen(h)}{\cos(\alpha)} \right]. \quad (10)$$

Os ângulos α , ϕ e z podem ser vistos na figura [13](#).

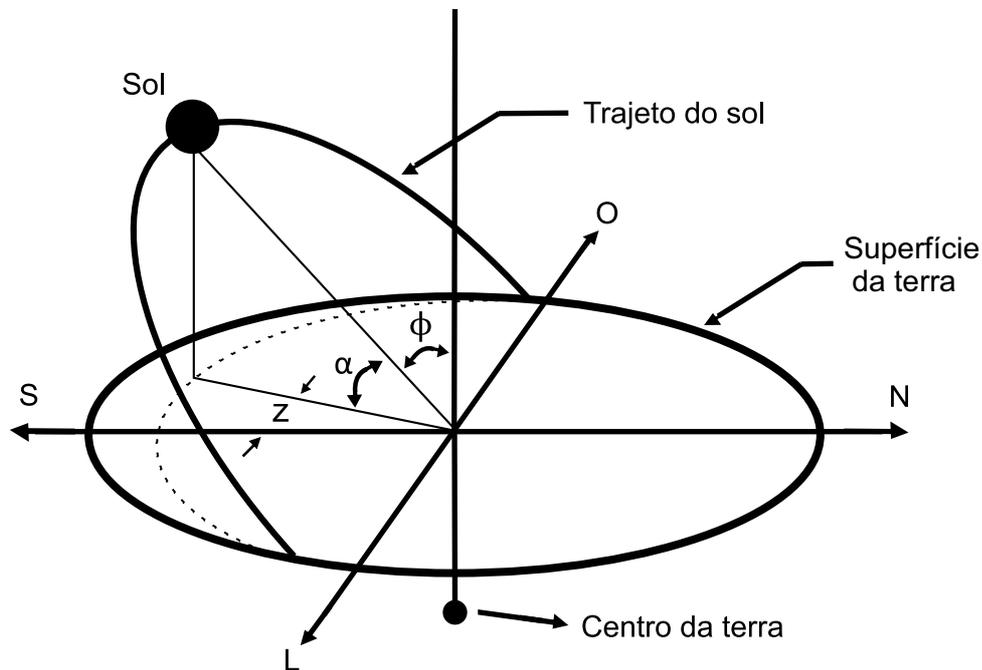


Figura 13: Ilustração dos ângulos de altitude solar, azimute e zênite

Fonte: Adaptado de [Kalogirou \(2009\)](#)

2.2.3 Ângulo entre um eixo paralelo à linha Leste-Oeste e os raios solares (k) e Ângulo de inclinação do espelho refletor

Para que o sistema funcione de forma autônoma é fundamental que o ângulo dos espelhos refletores varie de forma a seguir a posição do sol durante todo o dia. Para calcular a inclinação necessária é preciso saber antes a variação do ângulo solar referente a mudança de posição, em outras palavras, o ângulo entre um eixo paralelo à linha Leste-Oeste e os raios solares (k), pois os espelhos são posicionados no sentido norte-sul. A equação para determinar k é dada por [Kalogirou \(2009\)](#):

$$k = \arccos \sqrt{\sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) \sin^2(h)}. \quad (11)$$

A lei da reflexão diz que o ângulo de incidência dos raios solares refletidos em uma superfície especular, em relação a normal da superfície, é igual ao ângulo de reflexão, como mostrado na figura [14](#). Sendo assim, o ângulo de inclinação do espelho refletor (γ) pode ser determinado através de uma relação com: o ângulo k ; o ângulo θ , que é a inclinação entre a superfície receptora e a linha de espelho; e o ângulo de incidência solar (i).

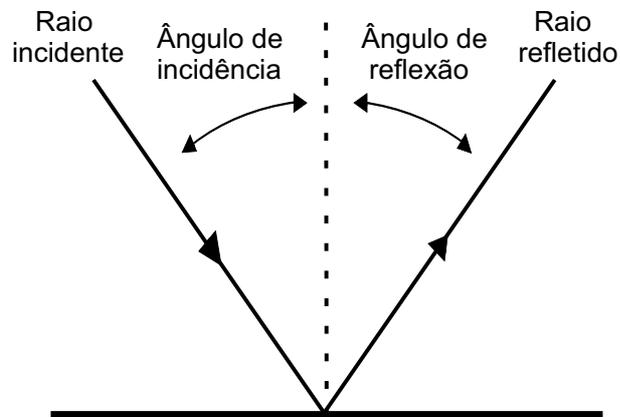


Figura 14: Trajetória de um raio solar refletido em uma superfície especular

Fonte: Adaptado de Cruz (2012)

A figura 15 mostra os ângulos associados ao processo de rastreamento.

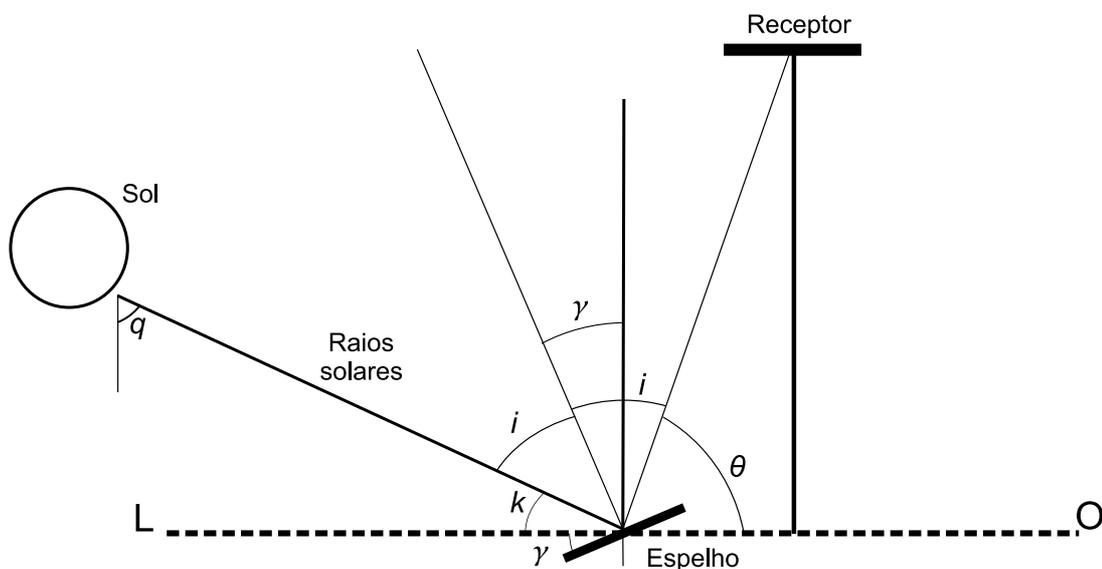


Figura 15: Ângulos associados ao espelho refletor para rastreamento no sentido Leste-Oeste

Fonte: Adaptado de Negreiros (2015)

Analisando os dois quadrantes da figura 15 é possível relacionar os ângulos k , i e θ da seguinte forma:

$$k + 2i + \theta = 180^\circ,$$

em que o ângulo de incidência solar é dado por (NEGREIROS, 2015):

$$i = \frac{180^\circ - k - \theta}{2}. \quad (12)$$

Analisando apenas o segundo quadrante encontra-se a relação entre k , i e γ , dada por:

$$k + i + \gamma = 90^\circ. \quad (13)$$

Substituindo [12](#) em [13](#) encontra-se:

$$\gamma = 90 - \left(k + \frac{180 - k - \theta}{2} \right),$$

e assim, γ é definido por (NEGREIROS, 2015):

$$\gamma = \frac{\theta - k}{2}. \quad (14)$$

Devido a reflexão a radiação solar refletida pelo espelho plano cobrirá uma área maior que a incidente proveniente do sol, esse processo é mostrado na figura [16](#).

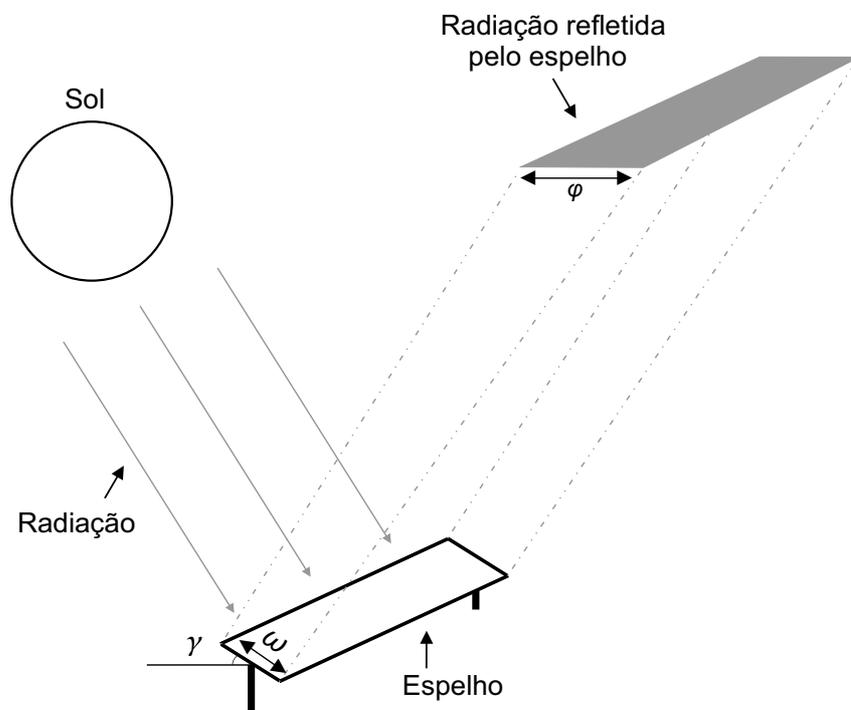


Figura 16: Largura da faixa de radiação que incide sobre o receptor

A largura da faixa de radiação incidente (φ) pode ser determinada por

(SAETTONE, 2014):

$$\varphi = \omega \left(\frac{45^\circ + \left(\frac{\theta - q}{2}\right)}{\text{sen}(\theta)} \right), \quad (15)$$

sendo ω a largura do espelho refletor e q é dado pela soma da declinação solar com a latitude local. Dessa forma (SAETTONE, 2014):

$$q = \delta + Ls. \quad (16)$$

2.2.4 Erro de inclinação do espelho refletor

Quando o espelho refletor tiver um erro de inclinação, como mostrado na figura 17, parte da radiação refletida pelo espelho não incidirá sobre o receptor.

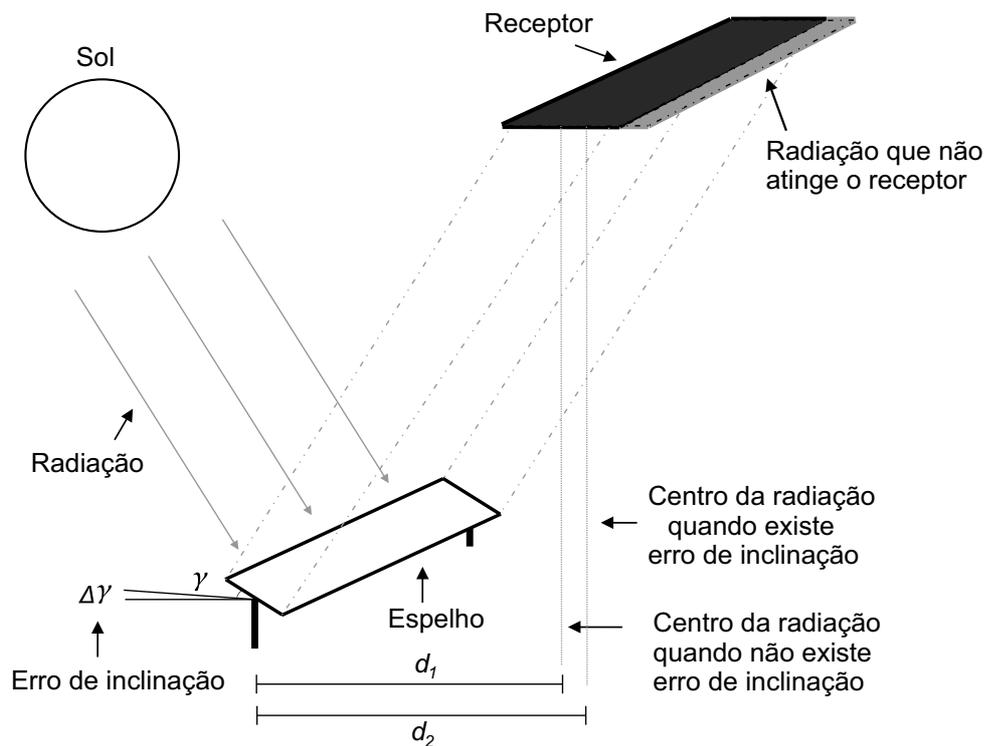


Figura 17: Perda de radiação devido ao erro de inclinação do espelho

O ângulo de inclinação do espelho, para os casos em que existe um erro de inclinação, é representado por γ_r . E é definido por:

$$\gamma_r = \gamma + \Delta\gamma, \quad (17)$$

sendo $\Delta\gamma$ o erro de inclinação angular. Esse erro fará com que haja uma variação no valor de θ , que, para os casos em que existe um erro de inclinação, é representado por θ_r , e é dado por:

$$\theta_r = 2\gamma_r + k. \quad (18)$$

A radiação é deslocada do centro do receptor devido ao erro de inclinação, por isso parte dos reflexos incidem fora do receptor. A nova distância entre o centro da radiação incidente e o espelho refletor, após o deslocamento, é representada por d_2 e é definida por:

$$d_2 = \frac{A_{rec}}{\theta_r}, \quad (19)$$

onde A_{rec} é a altura do receptor. O desvio do foco (Δd), em centímetros, é dado por:

$$\Delta d = (d_2 - d_1)100, \quad (20)$$

sendo d_1 a distância entre o centro da radiação que incide sobre o receptor e o espelho refletor, quando não existe erro de inclinação do espelho.

Quando o espelho utilizado é plano e tiver a mesma largura do receptor, qualquer valor de $\Delta d \neq 0$ irá gerar perda de radiação. Nos casos em que o receptor for maior que o espelho, o erro de deslocamento máximo permitido (Δd_{per}) para que não exista perda de radiação, será:

$$\Delta d_{per} = \left(\frac{L_{rec} - \varphi}{2} \right), \quad (21)$$

em que L_{rec} é a largura do receptor. Caso $\Delta d > \Delta d_{per}$ parte da radiação incidirá fora do receptor. Essa porção de radiação perdida (L_{prp}) é determinada por:

$$L_{prp} = \Delta d - \Delta d_{per}. \quad (22)$$

A porcentagem de radiação que incide fora do receptor (P_p) é dada por:

$$P_p = \left(\frac{L_{prp}}{\varphi} \right) 100. \quad (23)$$

Com relação aos fatores que contribuem para que haja erros de inclinação

e, conseqüentemente, perda da radiação solar, serão descritos na próxima subseção.

2.2.4.1 Fatores que contribuem para o erro de inclinação do espelho

Diversos fatores podem ocasionar pequenos desvios angulares na posição do espelho durante o processo de rastreamento solar, contribuindo para que a radiação não incida exatamente no ponto central do receptor. Um desses fatores é o erro existente nas equações de rastreamento solar (PRINSLOO; DOBSON, 2009). São várias modelagens de rastreamento solar descritas na literatura e todas possuem um erro associado. Wilkinson (1981) obteve erro de $0,013^\circ$ em seu equacionamento, mais tarde Michalsky (1988) descreve erro de $0,011^\circ$. Reda e Andreas (2004) conseguiram obter $0,0003^\circ$, porém, utilizam uma grande quantidade de cálculos. Por isso Grena (2008), propôs um método, baseado na pesquisa de Reda e Andreas (2004), obtendo erro de 0.0027° e reduzindo a complexidade, pois não é necessário que toda a modelagem original seja utilizada. Kalogirou (2009) descreve um equacionamento de fácil entendimento e implementação, servindo de base para vários trabalhos (CRUZ, 2012; NEGREIROS, 2015; GUPTA *et al.*, 2015; BARBÓN *et al.*, 2016).

Outros fatores que podem gerar erros de inclinação estão associados com: tempo e distúrbios externos (REDA; ANDREAS, 2004); alinhamento da estrutura mecânica (REDA; ANDREAS, 2004; PRINSLOO; DOBSON, 2009); precisão do motor (HOYOS *et al.*, 2009); desalinhamentos da estrutura em relação ao norte geográfico (RUBIO *et al.*, 2007) e sensor de posição (HOYOS *et al.*, 2008; NEGREIROS, 2015).

Com exceção dos erros de alinhamento da estrutura mecânica e desalinhamentos da estrutura em relação ao norte geográfico, os fatores acima estão relacionados com o desvio da radiação no sentido do rastreamento. Isso significa que, para um espelho posicionado no sentido norte-sul, fazendo o rastreamento no sentido leste-oeste, o erro será sempre no sentido leste-oeste. Os erros de alinhamento da estrutura e o desalinhamento da estrutura em relação ao norte geográfico, porém, podem ocasionar erro nos dois sentidos. Outra componente que faz a radiação incidente se deslocar no eixo norte-sul, para um seguimento no sentido leste-oeste, é a variação dos dias do ano. De acordo com Gea *et al.* (2012) e Saravia *et al.* (2014), com a mudança das estações a inclinação com que os raios solares atingem os espelhos refletivos varia, fazendo com que a radiação refletida pelo espelho se desloque no sentido sul. Sendo assim, é necessário que o receptor tenha um comprimento por

volta de 6 metros maior que o campo de espelhos, para que a radiação sempre incida sobre a superfície, em qualquer época do ano.

Sharma *et al.* (2016) cita outros fatores associados a eficiência do concentrador solar: efeito cosseno, transmissividade da cobertura do receptor, fator de intercepção, reflexividade dos refletores, absorção do tubo absorvente e perdas térmicas.

O foco deste trabalho está em desenvolver um sensor de posição com alta precisão, buscando reduzir erros associados ao processo de rastreamento solar. A próxima subseção aborda o erro associado a este componente e sua contribuição para o erro de inclinação do espelho.

2.2.5 Erro de medição do sensor de posição

A figura 18 ilustra um sensor de posição acoplado ao espelho refletor, através de uma polia, para leitura do ângulo de inclinação ao longo do dia.

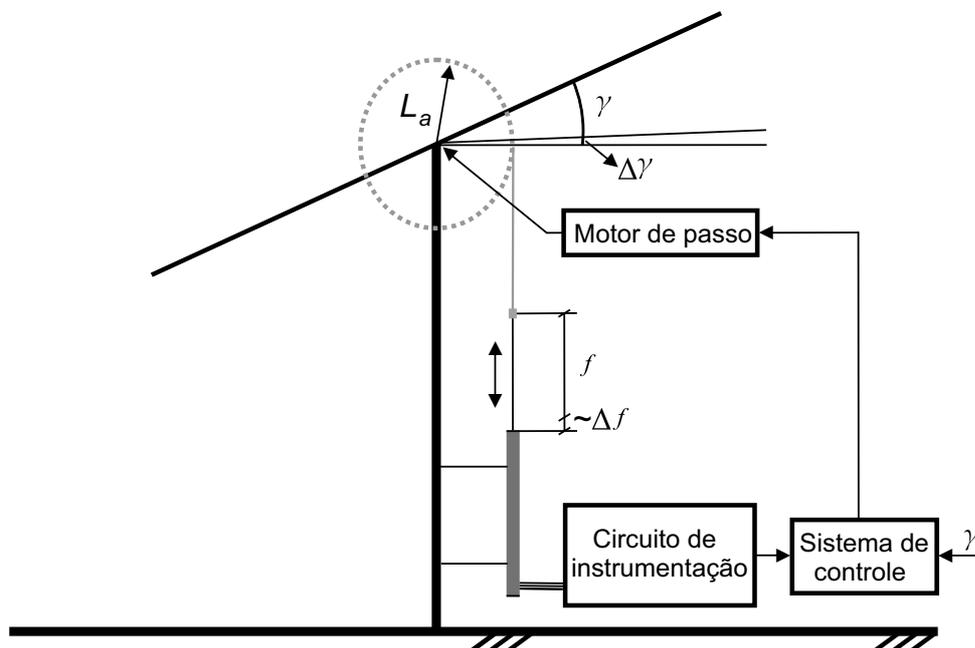


Figura 18: Sensor de posição acoplado ao espelho

Para cada ângulo de inclinação γ existe um pequeno erro angular ($\Delta\gamma$) associado à medição feita pelo sensor e o valor lido será ligeiramente diferente do real. Quando este sensor não tiver boa precisão o processo de rastreamento terá erro significativo, o que irá gerar perdas altas de radiação.

Sabendo o erro de medição do deslocamento (Δf) é possível determinar o erro angular associado:

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta f}{L_a}, \quad (24)$$

sendo L_a o raio da polia.

Deve-se implementar um sistema que possibilite alcançar um $\Delta\gamma$ reduzido. Dessa forma, a próxima seção descreve as ferramentas utilizadas em diversos trabalhos, que buscavam alcançar esse objetivo.

2.3 SENSORES DE POSIÇÃO PARA REFLETOR LINEAR FRESNEL

Atualmente diversas aplicações requerem a utilização de sensores de deslocamento (FOWLER; SCHMALZEL, 2004), entre eles, os potenciômetros e os LVDTs (SANTHOSH; ROY, 2012). Com o avanço da tecnologia, sensores de deslocamento tradicionais e novos são necessários e precisam estar em constante evolução, para que os requisitos das novas tecnologias possam ser satisfeitos (FÉLIX *et al.*, 2010). Isso faz com que sensores já existentes sejam estudados e novas metodologias sejam propostas, como, inclinômetro (ANDÒ *et al.*, 2007) e magnetômetro (LOVE *et al.*, 2005).

Com relação aos concentradores solares do tipo refletor fresnel linear, sabe-se que é necessário implementar um sistema de rastreamento solar, para que durante todo o dia a radiação incida sobre o receptor. Em alguns trabalhos da literatura verificou-se a utilização de sensores de posição para aumentar a eficiência do processo de rastreamento (HOYOS *et al.*, 2008; NEGREIROS, 2015). Porém, na maioria das pesquisas o rastreamento é feito sem utilizar sensor de posição. Em alguns casos o seguimento é feito de forma manual (ALMEIDA, 2013; SAETTONE, 2014). Em outros utilizou-se motores de passo para variar o ângulo do espelho refletor, sem implementar sensor de posição para um ajuste fino (SALVO *et al.*, 2009; FERRETTI *et al.*, 2010; GEA *et al.*, 2012; ECHAZÚ *et al.*, 2013; LIN *et al.*, 2013; SARAVIA *et al.*, 2014). Para estes casos a velocidade do motor é ajustada de forma a seguir o movimento do sol durante o dia. Salvo *et al.* (2009) e Lin *et al.* (2013) citam que foi necessário realizar pequenas correções, de forma manual, na inclinação dos espelhos durante os testes, para que a radiação continuasse a incidir sobre o receptor. Verifica-se, dessa forma, que para atingir alta precisão no processo de rastreamento, a utilização apenas do motor

de passo só é suficiente nos casos em que existe ajustes manuais em intervalos de tempo. Contudo, se um sensor for acrescentado o próprio sistema faz o ajuste de possíveis erros de inclinação, ocasionados por diversos motivos, dentre eles: perdas de passo, falhas de rotação ou os ocasionados por perturbações externas.

Hoyos *et al.* (2008) propuseram dois sistemas que utilizam sensores de posição: O primeiro sensor proposto possui um cilindro, com dois fotoresistores em seu interior. São posicionados de forma que um fique voltado para o leste e outro para o oeste. Os fotoresistores são acoplados a uma ponte de wheatstone. O movimento da terra faz com que um dos resistores fique na sombra, o que faz sua resistência variar e, conseqüentemente, desequilibra a ponte. Neste momento o motor move a estrutura, para compensar a diferença de tensão. Este circuito possui limitações quando o dia está nublado, pois a iluminação sobre os fotoresistores será menor e o sistema perde o controle de posição; O segundo sistema proposto por Hoyos tenta eliminar as limitações do primeiro. Dessa vez utilizou-se dois LEDs, com tempo de resposta alto, dentro de um cilindro. Os LEDs são colocados de forma que seus sinais se subtraem. Um deles é para indicar se o sistema está focado, e outro para detectar se está nublado. Quando está nublado o motor continua movimentando o espelho porém com uma velocidade menor.

De acordo com a Tabela 5, se não está nublado e o sensor está iluminado o sistema deve se movimentar com velocidade próxima ao movimento da terra.

Tabela 5: Definições de condições para caracterizar a velocidade do motor para o sistema de Hoyos *et al.* (2008)

Nublado	Sinal do sensor	Tensão	Motor
Não	Iluminado	Negativa	Lento
Não	Sombra	Positiva	Rápido
Sim	Baixo	Próxima a zero	Lento

Se não está nublado e o sensor não está iluminado, deve-se aumentar a velocidade do motor, até que o sensor volte a ser iluminado, indicando que o espelho está na posição correta. Se estiver nublado o motor continuará movendo a estrutura, porém a uma velocidade menor, para que o sistema não se perca e volte mais rapidamente para a posição correta, quando o sol aparecer novamente no céu.

Os autores não citam a precisão do sistema proposto e nem os resultados de sua implementação.

O sensor de posição desenvolvido por (NEGREIROS, 2015) é baseado no princípio do sensor de proximidade indutivo. Este sensor de posicionamento possui uma parte fixa: composta de uma bobina e de um tubo circular feito de material isolante; e de uma parte móvel: composta por tubo circular ferromagnético.

A operação do sensor é baseada na variação do campo magnético gerada pela movimentação vertical da parte móvel do sensor, que é acoplada à haste do espelho. O deslocamento da parte móvel faz a tensão de saída do sensor variar, sendo possível associar valores de tensão diferentes para todos os ângulos de inclinação do espelho. O autor obteve erro máximo de $0,5^\circ$ no controle de posição do espelho refletor.

Uma análise das pesquisas citadas anteriormente mostra que são poucos os trabalhos voltados para implementação de sensores de posição para o concentrador fresnel. Considerando que o Refletor Linear Fresnel ainda não é uma tecnologia madura, muitos estudos precisam ser realizados, visando aumentar a eficiência desse sistema térmico e torná-lo mais atrativo do ponto de vista comercial. Sendo assim, é interessante avaliar a aplicação de outros sensores de posição a esta tecnologia. Para este trabalho foi escolhido o Transformador Diferencial Linear Variável, devido as suas características, que possibilitam sua vasta aplicação na indústria.

2.4 TRANSFORMADOR DIFERENCIAL LINEAR VARIÁVEL (LVDT)

O sensor de posição LVDT caracteriza-se como um método confiável para medição de deslocamento, força, nível, pressão e fluxo, entre outras grandezas físicas (SAXENA; LAL SEKSENA, 1989). Ganhou aceitação na indústria de controle de processo no final da Segunda Guerra mundial, principalmente pelo seu uso em torpedos, sistemas de armas e aeronaves (KESTER, 1999). Atualmente é um sensor amplamente utilizado (RAJ *et al.*, 2014), e é grande o número de pesquisas voltadas para este transdutor (YUN *et al.*, 2011).

O LVDT tem três bobinas enroladas em torno de um tubo de material isolante. A bobina do centro é a principal, e as externas são as secundárias. Os dois enrolamentos secundários devem ser idênticos, possuindo geometria similar e um número igual de espiras. São ligados em série para que as tensões de saída induzidas se oponham (KEITH *et al.*, 1999). Um núcleo ferromagnético cilíndrico desliza ao longo do eixo do tubo (FÉLIX *et al.*, 2010), alterando, dessa forma, a indutância mútua

entre o primário e secundários, variando linearmente o diferencial de tensão com o deslocamento (WU *et al.*, 2008). O sistema é ilustrado na figura 19.

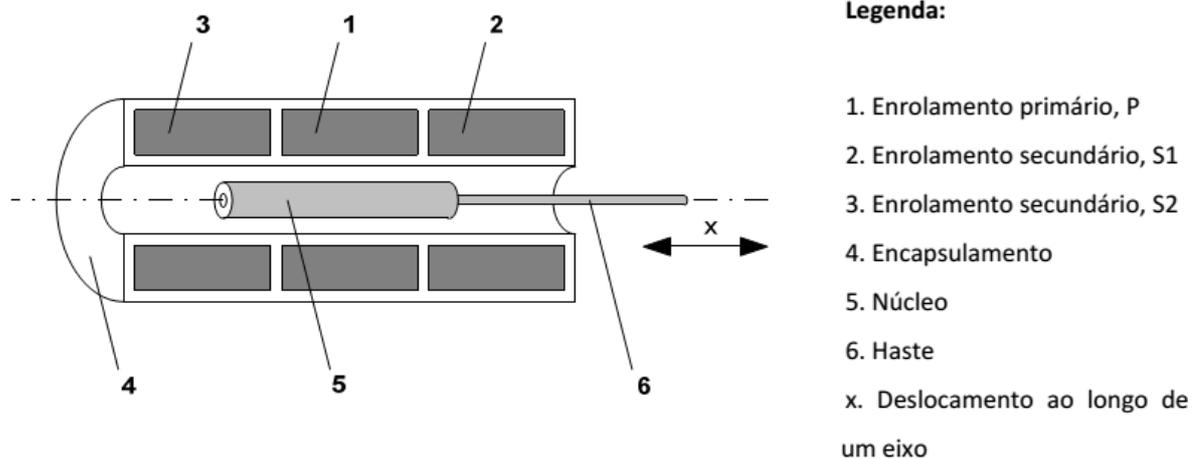


Figura 19: Constituição das partes de um LVDT

Fonte: Dias (2015)

A próxima subseção aborda os aspectos construtivos deste sensor e suas características.

2.4.1 Critérios construtivos

O LVDT é um sensor amplamente utilizado devido as suas características mecânicas e elétricas. Possui excelente vida útil, alta resolução, alcance de medição compatível com diversas aplicações, boa estabilidade e sem contato entre núcleo e bobinas. A tabela 6 compara algumas características do LVDT com outros sensores.

A tabela 6 mostra que o LVDT possui vida útil e resolução alta, não apresenta contato direto entre núcleo e espiras e que possui estabilidade média, comparado com outros sensores.

Verifica-se que, para o conjunto de características citadas na tabela, que o LVDT perde apenas em dois quesitos para um sensor e em um para outro. O magnetostrictivo possui um maior alcance de medição e maior estabilidade, suas outras características se igualam a do LVDT. O encoder possui maior estabilidade, sendo inferior em outras características, dependendo do modelo, e possuindo menor vida útil para qualquer modelo fabricado. Esses dados reforçam a importância do LVDT como sensor de posição.

Tabela 6: Comparação das características de diferentes sensores

Tecnologia	Absoluto	Sem contato	Vida útil	Resolução	Alcance	Estabilidade
Resistivo	Sim	Não	Baixo	Médio	Médio	Médio
Capacitivo	Sim	Alguns modelos	Alto	De baixo a alto	Baixo	Baixo
Indutivo	Sim	Sim	Alto	Médio	Médio	Baixo
LVDT	Sim	Sim	Alto	Alto	Médio	Médio
Efeito Hall	Sim	Sim	Alto	Alto	Baixo	Baixo
Magneto-resistivo	Sim	Sim	Alto	Alto	Baixo	Baixo
Magnetostrictivo	Sim	Sim	Alto	Alto	Alto	Alto
Encoder	Alguns modelos	Alguns modelos	Médio	De baixo a alto	Médio	Alto

Fonte: Adaptado de Nyce (2004)

Na sequência será abordado mais detalhes sobre suas características mecânicas e elétricas.

2.4.1.1 Parte mecânica

O LVDT possui confiabilidade para utilização em ambientes hostis. Esta confiabilidade faz com que este sensor seja a escolha óbvia e, muitas vezes, única para aplicações de processos químicos, aeroespaciais, da indústria nuclear e outras aplicações de precisão sob condições ambientais extremas (NOVACEK, 1999).

De acordo com Krelling (2006) a principal vantagem deste sensor é a robustez, pois seus componentes não se tocam, aumentando sua vida útil devido a falta de atrito. Além disso, possui boa precisão (MOTTA, 2002), sensibilidade, resolução infinita (MASI *et al.*, 2008) e linearidade (KESTER, 1999), que chega a 0,05% (ARENY, 2004). E de acordo com Tian *et al.* (1997) alta repetibilidade, isolamento elétrico total, ampla resposta dinâmica e sensibilidade direcional. Fan *et al.* (2011) cita ainda: vida mecânica ilimitada, bobina e núcleo separáveis e repetibilidade no ponto zero.

Pelo fato do atrito entre núcleo e enrolamentos ser pequeno a vida útil do LVDT se torna quase ilimitada, com alta confiabilidade. O tempo de operação do sensor, antes que venha a apresentar falhas, pode ser de até 228 anos (ARENY, 2004).

A resolução deste sensor é infinita pelo fato de seu princípio de funcionamento se basear na transferência eletromagnética. O que torna possível para um sistema eletrônico adequado medir a menor fração de variação do campo magnético deste sensor (KRELLING, 2006).

[Seidel \(2011\)](#) cita a possibilidade de medir deslocamentos com alcances típicos de 100 μm a 25 cm e sensibilidade de 100 mV/cm a 40 mV/ μm . [Masi et al. \(2007\)](#) obteve 20 μm de incerteza em suas medições, já [Martino et al. \(2010a\)](#) conseguiu alcançar 12 μm de incerteza. [Keith et al. \(1999\)](#) confirma a possibilidade de atingir valores ainda menores, afirmando que os LVDTs são sensíveis o suficiente para serem utilizados em aplicações em que se deseja medir deslocamentos abaixo de 0,5 μm e têm faixa de temperatura operacional de -265 °C a 600 °C.

2.4.1.2 Parte elétrica das bobinas

A indutância de uma bobina depende inteiramente da sua construção física. Um dos fatores mais importantes que afeta a indutância é o número de espiras. Dobrando o número de espiras se produz um fluxo magnético duplamente mais forte. Um campo duplamente mais forte corta duas vezes mais o número de espiras, induzindo quatro vezes a tensão ([MUSSOI, 2005](#)). Sabendo que:

$$L = \frac{\mu n e^2 A}{l}, \quad (25)$$

onde L é a indutância da bobina, ne o número de espiras, A é a área das espiras e μ a permeabilidade do núcleo. Verifica-se que a indutância varia diretamente com o quadrado do número de espiras.

Deve-se considerar também o diâmetro e a área transversal do núcleo. Quando o diâmetro do núcleo é grande vai existir mais linhas de campo, em relação a um núcleo com diâmetro menor. A indutância em uma bobina aumenta diretamente com o aumento da área transversal do núcleo. Dobrando-se o raio do núcleo, a indutância aumenta por um fator de 4.

O espaçamento entre as espiras da bobina também afeta a indutância. A figura [20](#) mostra dois exemplos. Para o primeiro caso o núcleo tem três espiras, bem espaçadas, de forma que a bobina se torna mais longa. Isso diminui a interação de fluxo, devido à grande distância entre cada espira, reduzindo a indutância. O segundo mostra espiras mais próximas, diminuindo o tamanho da bobina. Este pequeno espaçamento entre as espiras aumenta a interação do fluxo, aumentando a indutância da bobina. Dobrando o comprimento de um núcleo, enquanto se mantém o mesmo número de espiras, o valor da indutância diminui pela metade ([MUSSOI, 2005](#)).

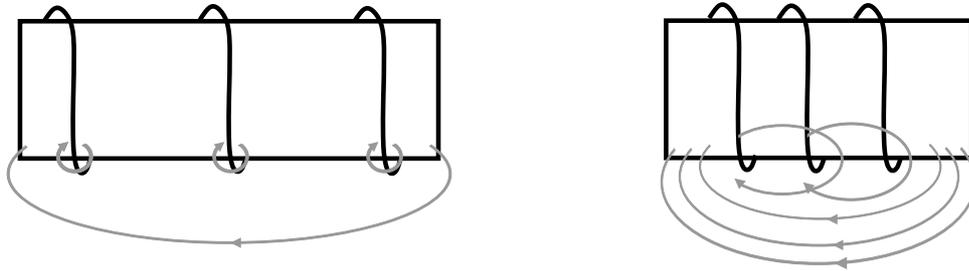


Figura 20: Interação de fluxo para espaçamento pequeno e grande entre espiras.

Fonte: Adaptado de [Mussoi \(2005\)](#)

O material que compõe o núcleo também é um fator determinante para a indutância da bobina. A figura [21](#) mostra dois núcleos. Para o primeiro caso o núcleo é feito de ar e no segundo de ferrite. O ferrite é um caminho melhor que o ar para as linhas de campo, pois possui alta permeabilidade para o fluxo magnético. Dessa forma, terá maior concentração das linhas de campo, aumentando a indutância da bobina ([MUSSOI, 2005](#)).

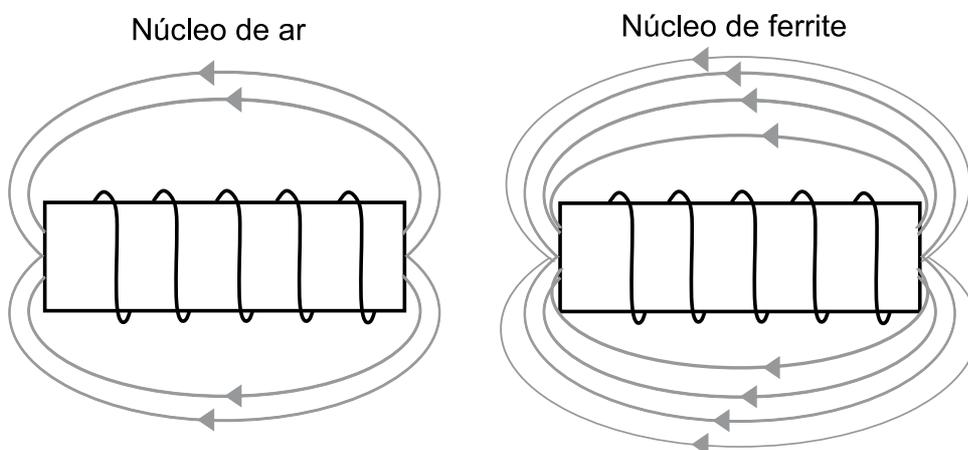


Figura 21: Comparação da concentração das linhas de campo para núcleo de ar e núcleo de ferrite.

Fonte: Adaptado de [Mussoi \(2005\)](#)

Pode-se incrementar ainda o valor da indutância enrolando a bobina em camadas. A figura [22](#) mostra três bobinas com número de camadas diferentes. Uma bobina com uma única camada e espiras separadas é mostrada na figura [22](#) (a). Ela tem resultado inferior se comparado aos demais. Com essa configuração o movimento do fluxo não é articulado efetivamente, pois existe somente uma camada de espiras. Um indutor de maior indutância é mostrado em [22](#) (b). As espiras estão com pouco

espaçamento e estão enroladas em duas camadas. As duas camadas interagem fortemente uma com a outra através do fluxo concatenado, devido ao grande número de espiras. Além disso, as espiras estão próximas entre si, gerando um incremento na interação do fluxo (MUSSOI, 2005).

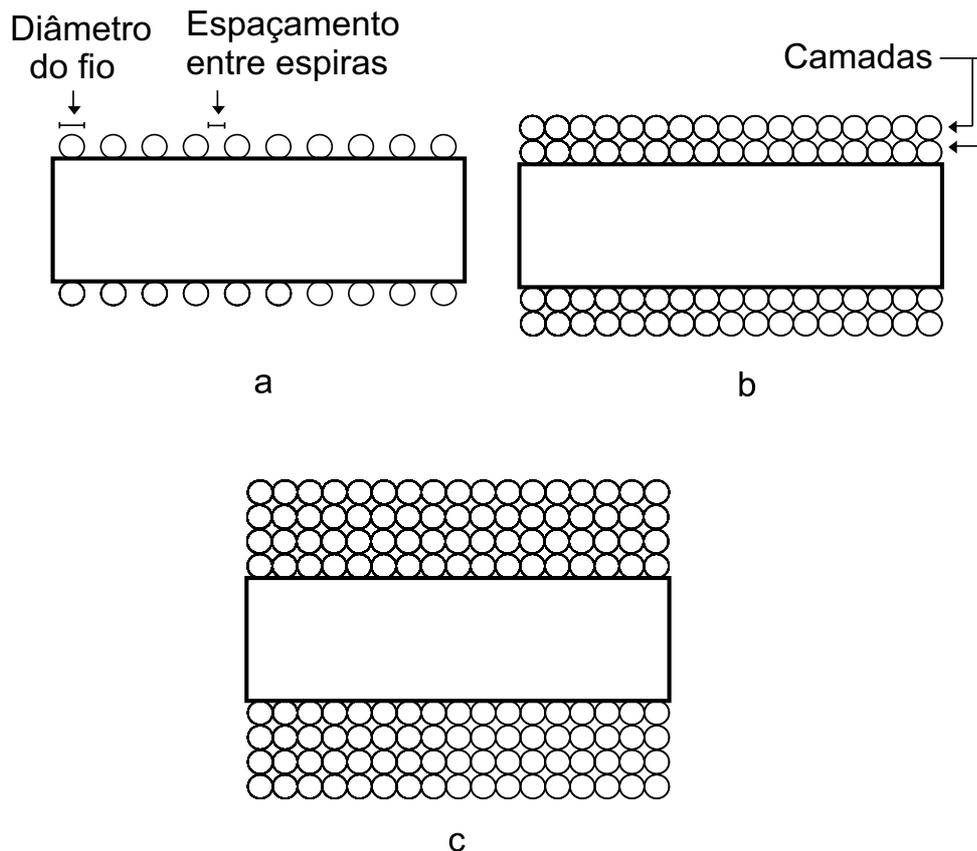


Figura 22: Bobinas com diferentes camadas.

A figura 22 (c) mostra uma bobina com um número maior de camadas. Essa montagem melhora a interação do fluxo concatenado. Pode-se acrescentar ainda mais camadas sucessivamente, porém isso irá aumentar ainda mais a indutância da bobina (MUSSOI, 2005).

Para uma bobina com várias espiras, além da indutância e da resistência existe uma capacitância parasita entre as espiras da bobina, como pode ser visto na figura 23. A figura 24 mostra essa capacitância em um bobina com várias camadas. O efeito total, visto na figura 25, é como se um pequeno capacitor fosse conectado em paralelo com a bobina. Este é o circuito equivalente de um indutor em frequências altas. Em baixas frequências, a capacitância pode ser ignorada, porém em altas frequências ela é suficientemente grande para afetar a operação do circuito.

A bobina passa a se comportar como um circuito RLC complexo e não apenas como um indutor puro, possuindo uma frequência de ressonância própria (FRENZEL JUNIOR, 2013).

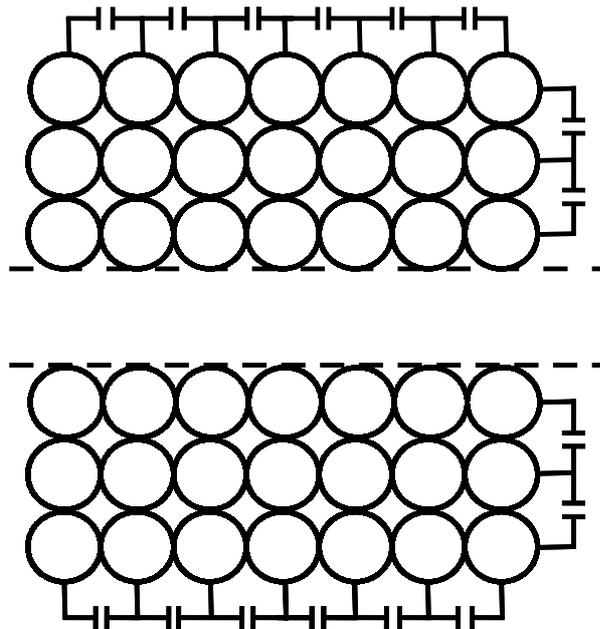


Figura 23: Capacitâncias entre camadas e entre espiras, para uma bobina com várias camadas.

Fonte: Adaptado de Jutty et al. (1993)

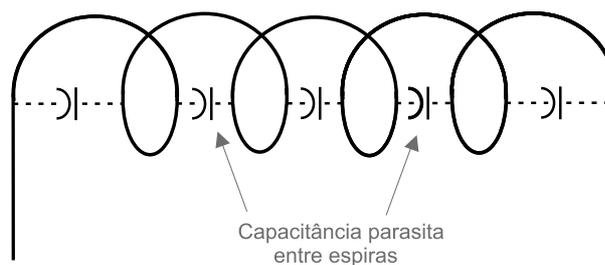


Figura 24: capacitância parasita entre espiras.

Fonte: FRENZEL JUNIOR (2013)

Para um circuito RLC paralelo a frequência de ressonância (f_r) é dada por:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (26)$$

Quando o número de espiras da bobina é aumentado haverá maior indutância e capacitância na bobina e, conseqüentemente, a frequência de ressonância

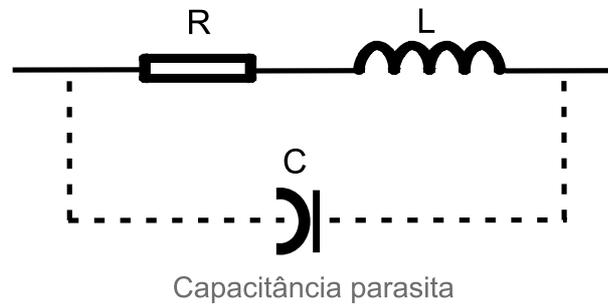


Figura 25: circuito equivalente de um indutor em frequências altas.

Fonte: [FRENZEL JUNIOR \(2013\)](#)

será menor, o que pode ser um problema. Em aplicações onde há grandes variações de temperatura, se a operação do sensor estiver na frequência de ressonância, a tensão de saída poderá sofrer variações devido à resistência. Além disso, o ideal é que a capacitância parasita entre as bobinas seja reduzida, para minimizar as harmônicas. Deve-se ter uma alta indutância na bobina, diminuindo a influência da variação da resistência. Além disso, segundo [Yañez-Valdez et al. \(2012\)](#) para produzir uma maior sensibilidade no sensor, o número de espiras no enrolamento secundário deve ser o maior possível.

A capacitância parasita surge devido a proximidade das espiras que compõem a bobina. Em altas frequências são responsáveis por reduzir o valor da frequência de ressonância ([HIGASHI, 2006](#)).

2.4.2 Materiais para confecção

A haste acoplada ao núcleo deve ser de material não-ferroso ([COSTA JUNIOR, 2005](#)), para que não interfira nas medições. Materiais condutores, como o alumínio, não apresentam bons resultados, devido à corrente de fuga que podem gerar, interferindo na resposta linear do LVDT. Aço inox da série 303 e 304 são boas escolhas para a haste ([TRANSTEK, 2010](#) apud [VEIGA; J., 2007](#)), além de ter alta durabilidade em ambientes industriais, sendo recomendado tanto para a construção da haste quanto para revestir o corpo do sensor ([ALVES, 2007](#)). Outra boa opção para construção da haste é o bronze ([VEIGA; J., 2007](#)).

Para construção das bobinas do sensor o polipropileno se encaixa como uma boa opção, pois se enquadra entre os termoplásticos de maior resistência química e menor peso específico. Além de não reagir com grande maioria de agentes químicos

industriais, ser impermeável a líquidos e gases e apresentar mínima absorção de água, o que lhe concede boa estabilidade dimensional (HIPER METAL, 2016a). O nylon também é uma boa opção, pois possui ampla temperatura de trabalho (-40 a 100 °C), boa resistência ao desgaste, excelente isolamento elétrica e não acumula energia estática (HIPER METAL, 2016b).

O núcleo deve ser de material ferromagnético (MARTINO *et al.*, 2010b). Os LVDTs comerciais possuem núcleo de ferro para frequências menores ou ferrite para altas frequências (BANERJEE *et al.*, 2013). Yañez-Valdez *et al.* (2012) propuseram a utilização de aço-níquel, alegando que a fragilidade do ferrite o torna pouco atrativo para determinadas aplicações.

O LVDT possui alta precisão quando construído com os materiais adequados, mesmo assim, esta tecnologia possui algumas limitações. Esses fatores são descritos na próxima subseção.

2.4.3 Limitações do sensor

O desempenho do LVDT é influenciado por sua geometria, qualidade do material de construção do núcleo, variações da frequência de excitação e corrente, disposição dos enrolamentos primário e secundário e alterações na temperatura ambiente (SAXENA; LAL SEKSENA, 1989).

Na prática o LVDT possui algumas limitações que dificultam o seu comportamento ideal. Sabe-se que quando o núcleo se encontra na posição central é gerada uma pequena tensão nos terminais de saída, como pode ser visto na figura 26.

Segundo Keith *et al.* (1999) as capacitâncias parasitas entre primário e secundário contribuem para esse efeito. Masi *et al.* (2010) cita a geometria imperfeita, propriedades magnéticas não homogêneas e imperfeições do enrolamento. Mandal *et al.* (2014) menciona as harmônicas na tensão de excitação. Segundo Areny (2004), devido a saturação dos materiais magnéticos, aparece sobretudo a terceira harmônica. O autor afirma ainda que o efeito pode ser reduzido utilizando-se filtro passa baixa na saída e que a tensão residual normalmente é inferior a 1% do valor de tensão aplicado.

A temperatura também pode gerar interferências ao sistema através da variação da resistência elétrica no primário. Se a frequência de alimentação for alta a impedância L_1 é predominante em relação a R_1 e o efeito é amenizado (ARENY, 2004).

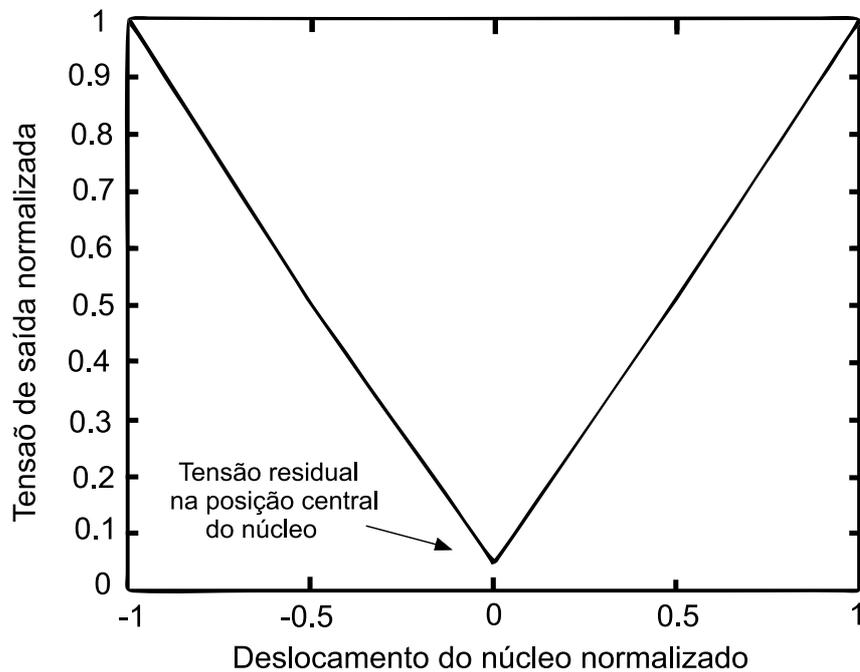


Figura 26: Tensão residual na posição central do núcleo do LVDT

Fonte: Adaptado de [COSTA JUNIOR \(2005\)](#)

Enfim, após análise dos fatores mecânicos e elétricos do sensor, é necessário realizar sua modelagem, para implementação do projeto do LVDT. Aqui será exposto dois modelos. O primeiro método considera as características geométricas do LVDT para determinar qual será tensão de saída. O segundo considera as características elétricas.

2.4.4 Modelagem do sensor LVDT através de seus dados geométricos

Os parâmetros geométricos de um LVDT podem ser vistos na figura [27](#). Em que h_1 é o comprimento do enrolamento primário, h_2 o comprimento do enrolamento secundário, D o diâmetro externo do cilindro formado pelos enrolamentos, d o diâmetro do núcleo, t_1 o comprimento do núcleo que está inserido no enrolamento secundário 1, t_2 o comprimento do núcleo que está inserido no enrolamento secundário 2, δ_1 a parcela do secundário 1 em que o núcleo não está inserido, δ_2 a parcela do secundário 2 em que o núcleo não está inserido, e por último, R é o raio de fluxo efetivo.

O circuito magnético equivalente é apresentado nas figuras [28](#) e [29](#).

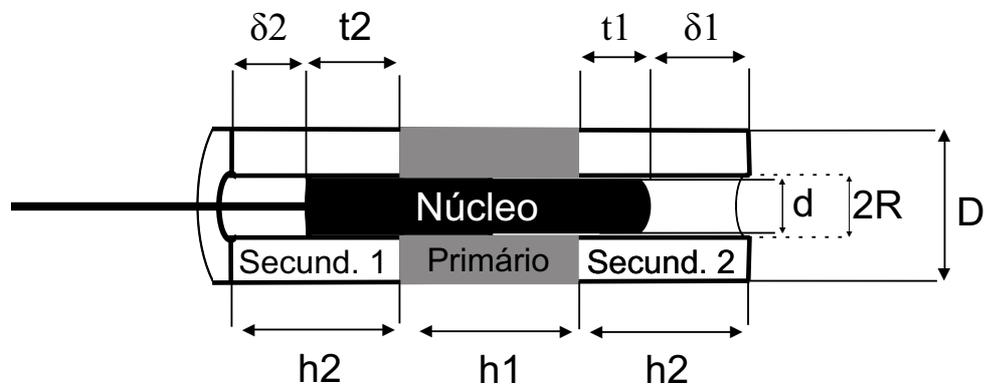


Figura 27: Esquemático geométrico do LVDT

Fonte: Adaptado de [Souza e Wanderley \(2008\)](#)

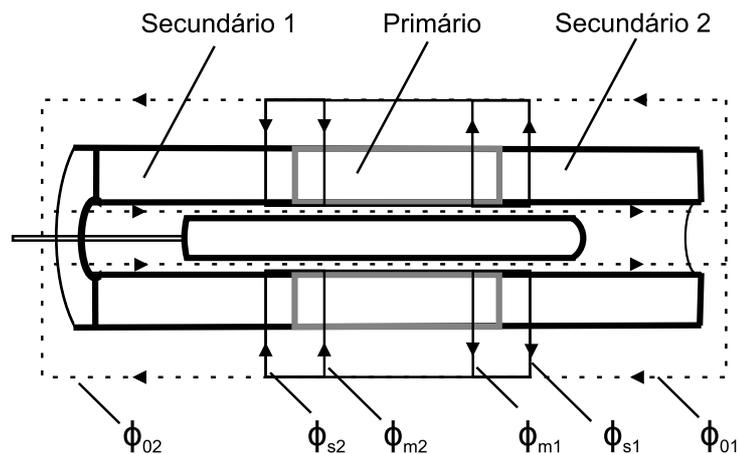


Figura 28: Fluxos lvdt

Fonte: Adaptado de [Tian et al. \(1997\)](#)

FMM é a força magnetomotriz, G_{01} , G_{s1} , G_{m1} , G_{02} , G_{s2} e G_{m2} são as condutâncias magnéticas dos fluxos magnéticos relativos. A ilustração em 3D é mostrada na figura [30](#).

Normalmente, a relutância magnética dos materiais magnéticos é muito menor do que a de um entreferro das mesmas dimensões e, portanto, aqui a relutância magnética dos materiais magnéticos pode ser negligenciada.

As condutâncias magnéticas podem ser dadas por ([TIAN et al., 1997](#)):

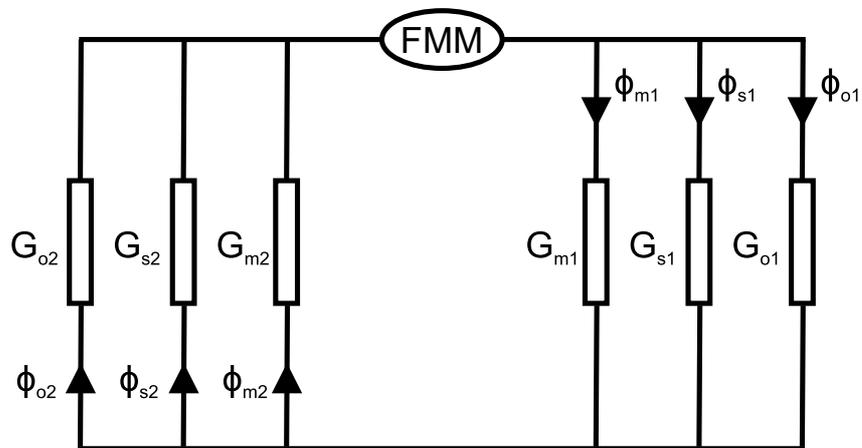


Figura 29: Circuito magnético equivalente do LVDT

Fonte: Adaptado de Souza e Wanderley (2008)

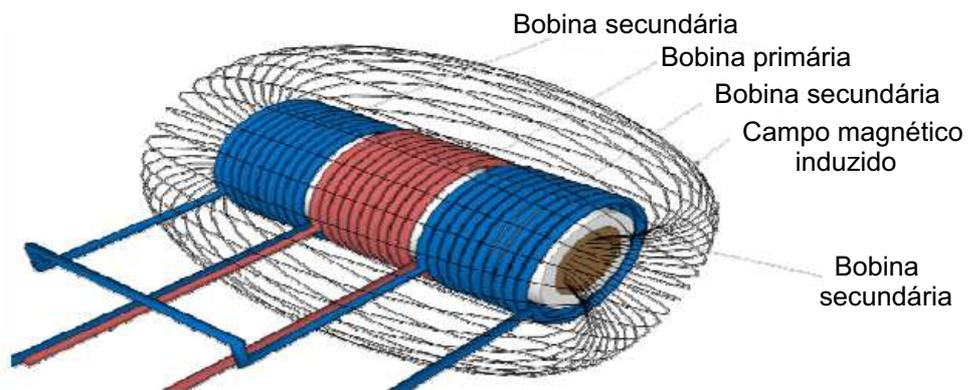


Figura 30: Campo magnético induzido

Fonte: Sarkar (2013)

$$G_{01} = \frac{\mu_0 \pi R^2}{\delta_1}, \tag{27}$$

$$G_{s1} = (h_2 - \delta_1)g. \tag{28}$$

De forma similar, para G_{02} e G_{s2} :

$$G_{02} = \frac{\mu_0 \pi R^2}{\delta_2}, \tag{29}$$

$$G_{s2} = (h_2 - \delta_2)g. \tag{30}$$

Onde μ_0 é a permeabilidade do ar e g é a condutância magnética específica entre superfícies cilíndricas, que pode ser obtida por (NEUBERT, 1975):

$$g = \frac{2\mu_0\pi}{\ln(D/d)}. \quad (31)$$

G_{m1} e G_{m2} são dados por (TIAN *et al.*, 1997):

$$G_{m1} = \frac{gh_1}{8}, \quad (32)$$

$$G_{m2} = \frac{gh_2}{8}. \quad (33)$$

É possível então determinar a condutância total do circuito magnético do enrolamento primário, assim como, sua indutância L_p (TIAN *et al.*, 1997):

$$G = (G_{01} + G_{s1} + G_{m1}) / (G_{02} + G_{s2} + G_{m2}), \quad (34)$$

$$L_p = N_p^2 G. \quad (35)$$

O fluxo ϕ_m não pode produzir indutância mútua pelo fato de não atravessar os enrolamentos secundários. O fluxo principal ϕ_0 , por sua vez, atravessa totalmente os enrolamentos secundários, e produzirá as indutâncias mútuas principais, M_{01} e M_{02} . O fluxo secundário ϕ_s , atravessa uma parte dos enrolamentos secundários, e produz indutâncias mútuas laterais, M_{s1} e M_{s2} . A indutância mútua total entre os enrolamentos primários e secundários é a soma das indutâncias mútuas principais e laterais, sendo M_1 a indutância mutua entre o enrolamento primário e secundário superior, e M_2 a indutância mutua entre o enrolamento primário e secundário inferior. As indutâncias podem ser determinadas por (TIAN *et al.*, 1997):

$$M_{01} = \frac{N_s N_p G_{01}}{2}, \quad (36)$$

$$M_{02} = \frac{N_s N_p G_{02}}{2}, \quad (37)$$

$$M_{s1} = \frac{N_p N_s g t_1^2}{4h_2}, \quad (38)$$

$$M_{s2} = \frac{N_p N_s g t_2^2}{4h_2}, \quad (39)$$

$$M_1 = M_{01} + M_{s1}, \quad (40)$$

$$M_2 = M_{02} + M_{s2}. \quad (41)$$

Onde N_p é o número de espiras do enrolamento primário e N_s é o número de espiras dos enrolamentos secundários.

Se não houver carga conectada aos terminais dos secundários e se os terminais dos secundários estiverem ligados, a tensão de saída pode ser definida por:

$$U_o = \frac{U_i N_s g t_0 \Delta t}{L_p}. \quad (42)$$

Onde U_i é a tensão de excitação da bobina primária, Δt é o deslocamento do núcleo e t_0 é o comprimento do núcleo magnético inserido nos enrolamentos secundários.

A modelagem exposta por [Tian et al. \(1997\)](#), demonstrada nesta seção, não considera a frequência de excitação do sensor. O mesmo autor comparou resultados de simulação com testes práticos que utilizavam frequência de 1Khz e tensão de 3 V sobre as bobinas primárias. Os resultados práticos e de simulação foram muito próximos, com diferença máxima em torno de 8,82 mV, quando utilizou-se um núcleo de ferrite. Sendo assim, a modelagem se mostrou eficaz e pode ser utilizada para verificar a influência do número de espiras, diâmetro das bobinas, do núcleo, comprimento das bobinas, etc, com a tensão de saída do lvdt. No entanto, o equacionamento apresentado considera apenas as características geométricas do sensor, na seção seguinte é mostrada a modelagem do LVDT como um circuito elétrico, considerando as resistências e indutâncias das bobinas. Assim como, a frequência de excitação.

2.4.5 Modelagem elétrica do sensor LVDT

O modelo matemático do LVDT pode ser deduzido analisando-se a figura

31.

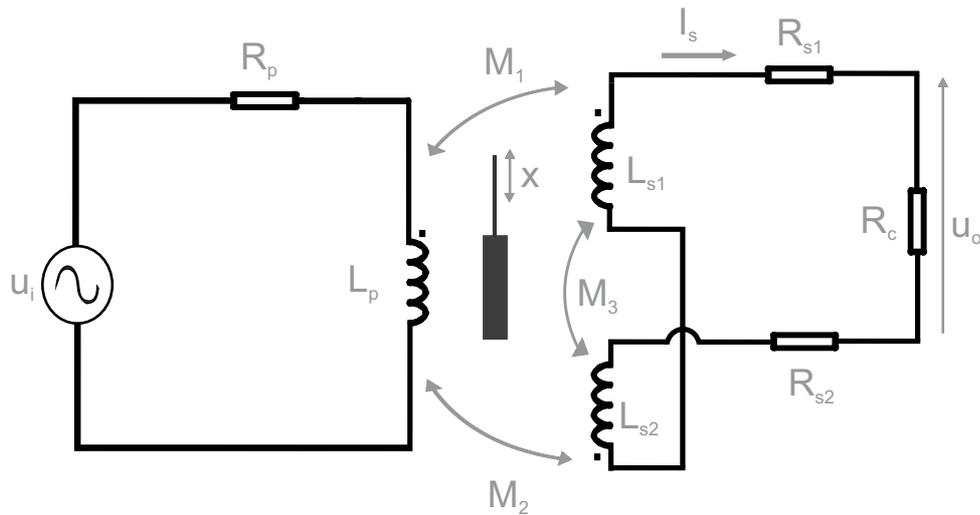


Figura 31: Circuito elétrico equivalente do LVDT

Fonte: Adaptado de [Areny \(2004\)](#)

Tem-se para o primário:

$$U_i = I_p(R_p + sL_p) + I_s(-M_1s + M_2s), \quad (43)$$

onde U_i é a tensão de entrada, I_p é a corrente no primário, R_p e L_p são a resistência e indutância do enrolamento primário, respectivamente. M_1 é a Indutância mútua entre os enrolamentos, primário e secundário 1 e M_2 a indutância mútua entre os enrolamentos, primário e secundário 2.

Para o secundário:

$$0 = I_p(-sM_1 + sM_2) + I_s(R_{s1} + R_{s2} + sL_{s1} + sL_{s2} - s2M_3), \quad (44)$$

onde I_s é a corrente no secundário, R_{s1} a resistência do enrolamento secundário 1, R_{s2} a resistência do enrolamento secundário 2, L_{s1} a indutância do enrolamento secundário 1, L_{s2} a indutância do enrolamento secundário 2 e M_3 a indutância mútua entre os enrolamentos secundário 1 e secundário 2.

Baseado na modelagem proposta por [Areny \(2004\)](#), [Dias \(2015\)](#) definiu que a função de transferência do sistema, para excitação em tensão, pode ser expressa por:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{sR_c 2ax}{L_p(L_s - 2M_3)s^2 + [R_p(L_s - 2M_3) + (R_s + R_c)L_p]s + R_p(R_s + R_c)}, \quad (45)$$

e para excitação em corrente:

$$\frac{U_o}{I_i} = \frac{sR_c(M_1 - M_2)}{s(L_s - 2M_3) + (R_c + R_s)}. \quad (46)$$

Sabendo que:

$$\begin{cases} L_s = L_{s1} + L_{s2}, \\ R_s = R_{s1} + R_{s2}, \\ a = \frac{M_1(x) - M_2(x)}{2x}. \end{cases} \quad (47)$$

Segundo [Dias \(2015\)](#), no domínio do tempo o módulo da tensão de saída é determinado por:

$$|U_o(\omega)| = 2aR_cU_i \frac{\omega}{\sqrt{(C - A\omega^2)^2 + (B\omega)^2}} |x|, \quad (48)$$

para excitação em tensão, e:

$$|U_o(\omega)| = 2aR_cI_i \frac{\omega}{\sqrt{(R_c + R_s)^2 + \omega^2(L_s - 2M_3)}} |x|, \quad (49)$$

para excitação em corrente. Sendo:

$$\begin{cases} A = L_p(L_s - 2M_3), \\ B = R_p(L_s - 2M_3) + R_s + R_c)L_p, \\ C = R_p(R_s + R_c). \end{cases} \quad (50)$$

As características elétricas do LVDT podem ser obtidas através de 2 ensaios, cujas montagens são ilustradas nas figuras [32](#) e [33](#).

Os 2 circuitos são excitados com uma tensão alternada U_{in} . Através do primeiro ensaio é possível obter as tensões U_p , U_R , uS , $U(U_p + U_R)$ e a corrente I_p . Essas tensões são utilizadas para obter a resistência R_p , a indutância L_p no primário

e a diferença entre as indutâncias mutuas M_1 e M_2 ($M_1 - M_2$).

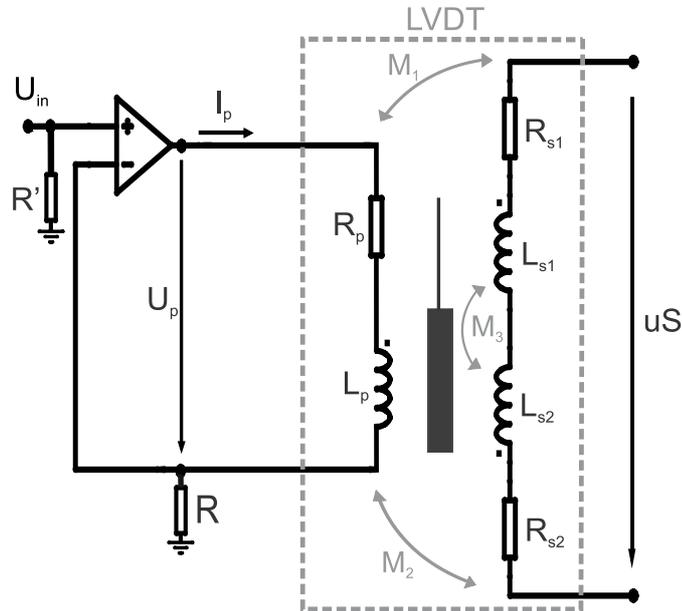


Figura 32: Ensaio para determinação dos parâmetros R_p , L_p e $(M_1 - M_2)$

Fonte: Adaptado de [Dias \(2015\)](#)

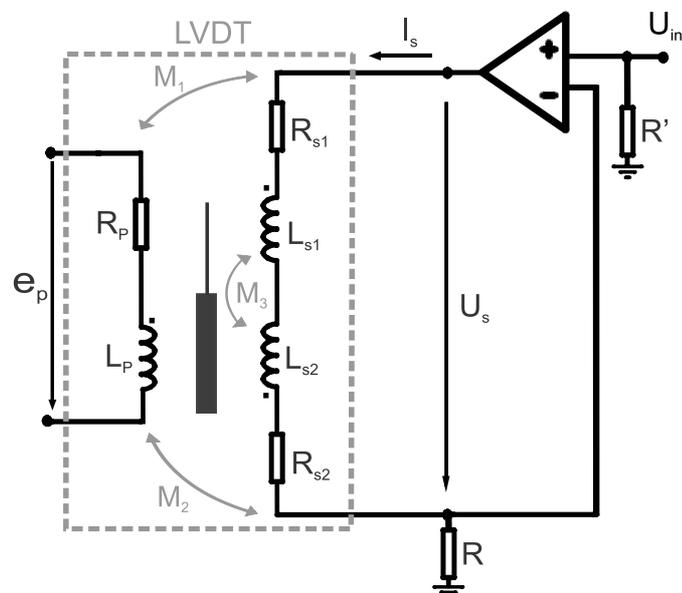


Figura 33: Ensaio para determinação dos parâmetros R_s e $(L_s - 2M_3)$.

Fonte: Adaptado de [Dias \(2015\)](#)

O segundo ensaio possibilita determinar as tensões e_p , U_s , U_R , $U(U_s + U_R)$ e a corrente I_s . Sendo possível obter, através de equacionamento, a resistência no se-

cundário (R_s) e a diferença entre, a indutância equivalente do enrolamento secundário e a indutância mútua entre os enrolamentos primário e secundário ($L_s - 2M_3$).

2.4.6 Condicionamento de sinal

Para que o sinal de um sensor seja processado é necessário a utilização de um circuito para condicionamento deste sinal. Ao conjunto condicionador de sinal e sensor é dado o nome de transdutor (SEIDEL, 2011), como é ilustrado na figura 34.

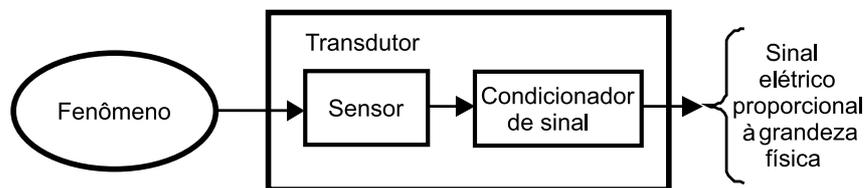


Figura 34: Funcionamento de um transdutor

Fonte: Adaptado de Seidel (2011)

Existem no mercado circuitos integrados demoduladores sensíveis à fase para condicionamento de sinal do LVDT, entre eles: AD698 (ANALOG DEVICES, 1995) e NE5521D (TURLEA, 1993). O NE5521D inclui: um oscilador de onda senoidal de baixa distorção, estável em amplitude e com frequência programável, para alimentar o primário do LVDT; um demodulador síncrono, para converter a amplitude de saída e a informação de fase em posição; e um amplificador de saída, para fornecer amplificação e filtragem do sinal demodulado (PHILIPS SEMICONDUCTORS, 2002).

O oscilador do NE5521D é composto por uma resistência e um capacitor externos e a frequência de oscilação é dada por (PHILIPS SEMICONDUCTORS, 2002):

$$f_{osc} = \frac{U_{Ref} - 1,3}{U_{Ref}(R_T + 1,5k)C_T}, \quad (51)$$

com C_T igual a:

$$C_T = \frac{10}{f_{osc}}(\mu F). \quad (52)$$

Com relação ao demodulador presente no NE5521D, seu esquemático é mostrado na figura 35. O sinal "sync" do circuito é proveniente da tensão nos terminais do primário após sofrer avanço de fase, de forma a ficar em sincronismo com a

tensão nos terminais das bobinas secundárias que, por sua vez, é obtida na “entrada do demodulador”. Durante o primeiro meio ciclo, à medida que o sinal que aparece em sync ultrapassa $U_{ref}/2$, o funcionamento do demodulador será como inversor, e a entrada do demodulador aparece invertida na saída. No segundo semiciclo, no momento em que o sinal de sincronismo se torna inferior a $U_{ref}/2$ o demodulador funciona como seguidor e a entrada do demodulador aparece com ganho unitário na saída. Portanto, a retificação ocorre em sincronismo com o sinal primário de acionamento. A amplitude do sinal retificado indica a posição do núcleo e a polaridade indica o lado do ponto zero em que o núcleo está. Os dispositivos de leitura, como medidores e gravadores, tem entrada em DC, por isso a saída do demodulador tem de ser convertida em contínua filtrada. Existe um amplificador no chip do NE5521D que pode ser utilizado como filtro ativo, para isso, os resistores e capacitores são adicionados externamente. Este filtro remove a frequência da portadora, e outras harmônicas de ordem superior, da saída do demodulador e produz uma saída DC sem ondulação (ZAHID, 1988).

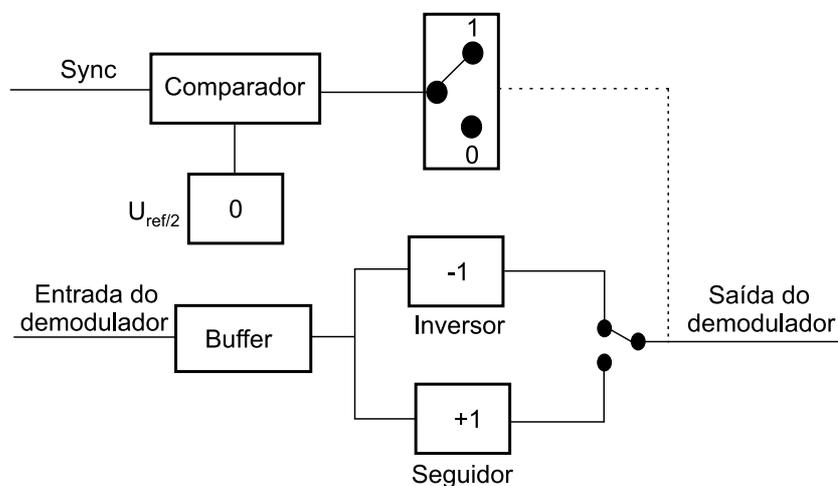


Figura 35: Esquemático do demodulador presente no NE5521D

Fonte: Adaptado de Zahid (1988)

O funcionamento mais detalhado do sistema é mostrado nas figuras 36 e 37.

A figura 36 ilustra o caso em que o núcleo está posicionado em uma das extremidades do sensor ($x=1$). Inicialmente sync é menor que 0, dessa forma, o valor enviado pelo comparador é igual a 0. O sinal proveniente da entrada do demodulador passa pelo inversor ou pelo seguidor, dependendo do sinal recebido do comparador.

Quando o valor recebido for 0 o inversor é acionado, caso contrário, o seguidor.

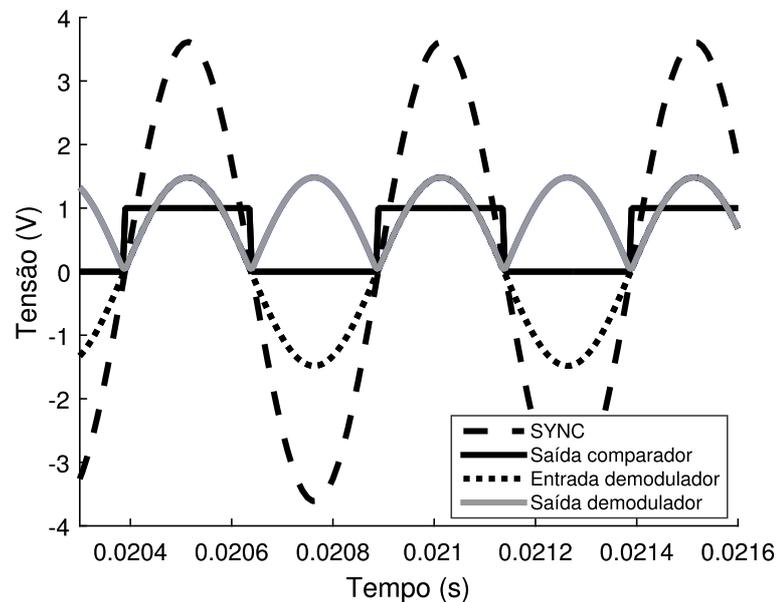


Figura 36: Funcionamento do bloco de demodulação na extremidade 1 do sensor

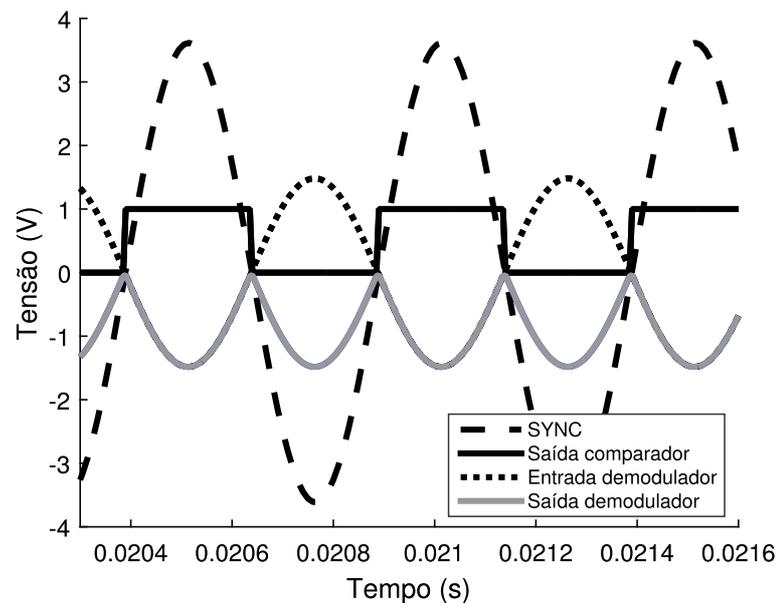


Figura 37: Funcionamento do bloco de demodulação na extremidade 2 do sensor

Ainda considerando a figura [36](#), inicialmente o valor de sync segue pelo inversor, e o sinal proveniente aparece positivo na saída do demodulador. No momento em que sync se torna positivo, o sinal enviado pelo comparador passa a ser 1, indi-

cando que o seguidor deve ser acionado ao invés do inversor, e assim, a saída do demodulador permanece positiva.

Quando o núcleo está posicionado na outra extremidade do sensor, processo ilustrado na figura 37, a fase da tensão de entrada do demodulador está invertida e, dessa forma, a saída será sempre negativa. Dessa forma, é gerado um valor diferente de tensão na saída do demodulador, em todo o percurso do sensor.

2.5 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DO ESPELHO REFLETOR

Sistemas de controle para posicionamento angular de sistemas solares em geral utilizam motores de corrente contínua ou de passo para fazer a movimentação angular do sistema mecânico (PEDROSA FILHO, 2010).

Diversos trabalhos referentes a seguidores projetados para painéis fotovoltaicos citam a utilização de motores de corrente contínua para movimentação do painel solar (KALOGIROU, 1996; ROTH *et al.*, 2004; GHONEIM, 2006; ALTAS; SHARAF, 2008; BAI *et al.*, 2011; HUANG *et al.*, 2011; BAJPAI; KUMAR, 2011; HUANG *et al.*, 2013; KHADIDJA *et al.*, 2014; BENTAHER *et al.*, 2014). Outros autores optaram por utilizar motores de passo (ABOUZEID, 2001; AKKAYA; KULAKSIZ, 2004; Amir ABAS *et al.*, 2010; TITIRSHA *et al.*, 2014). Yilmaz *et al.* (2015) implementou um sistema de seguimento em dois eixos para painéis fotovoltaicos. Um motor de corrente contínua movia o painel na direção vertical e um motor de passo movia horizontalmente.

Em sistemas térmicos, a escolha entre as tecnologias também se divide. Alguns autores optam pelos motores de passo (BARBOSA, 2009; ALERTA *et al.*, 2010; ZHAI *et al.*, 2010; FERRETTI *et al.*, 2010; GEA *et al.*, 2012; ECHAZÚ *et al.*, 2013). Outros pelos motores de corrente contínua (HOYOS *et al.*, 2008; PIGOZZO FILHO, 2013; NEGREIROS, 2015).

De acordo com Walker (2013) motores de corrente contínua são mais baratos e bons em fornecer níveis aceitáveis de torque. Porém, é mais complicado controlar a precisão e a posição de rotação do seu eixo, já que, giram a uma velocidade maior. Geralmente utiliza-se caixas de redução para reduzir sua velocidade de rotação.

Os motores de passo tem boa precisão e sua rotação possui ângulos específicos. Por este motivo, apesar de também necessitarem de caixas redutoras

quando aplicados em sistemas de rastreamento solar (HOYOS *et al.*, 2009), utilizam uma redução menor e, conseqüentemente, mais simples de serem construídas.

A partir das informações anteriores verificou-se que o motor de passo se caracteriza como sendo mais indicado para a aplicação em rastreamento solar de concentradores lineares de do tipo fresnel, motivo pelo qual foi escolhido nesta pesquisa. Dessa forma, a próxima seção aborda com mais detalhes o funcionamento desse motor.

2.5.1 Modos de operação do motor de passo

O torque disponível e o incremento de rotação do motor são determinados pela forma como as fases do motor são excitadas. A excitação pode ser feita de 3 formas: passo completo, meio passo e micro-passo. Energizando-se as fases uma ou duas de cada vez, na seqüência, obtêm-se o modo de passo completo. Se duas fases forem energizadas e uma desenergizada na seqüência, obtêm-se o funcionamento em meio passo. O modo de micro-passo faz uma variação quase que contínua da energização das fases, dessa forma, pode-se subdividir um passo por um número grande. Porém a complexidade do driver é maior e o método é menos preciso (CARDOZO, 2012).

A velocidade e o sentido de rotação são determinados pela ordem com que as fases são excitadas e pela frequência, respectivamente (CHOUZAL, 1991). A tabela 7 apresenta a seqüência para que o motor opere no modo de meio passo no sentido horário e a tabela 8 apresenta a seqüência para as rotações no sentido anti-horário.

Tabela 7: Seqüência para meio passo no sentido horário

Passo	A+	A-	B+	B-
0	+	-	-	-
1	+	-	-	+
2	-	-	-	+
3	-	+	-	+
4	-	+	-	-
5	-	+	+	-
6	-	-	+	-
7	+	-	+	-

Os dois modos de funcionamento, meio passo e passo completo, tem vantagens e desvantagens, esses fatores são apresentados na tabela 9.

Tabela 8: Sequência para meio passo no sentido anti-horário

Passo	A+	A-	B+	B-
0	-	-	+	-
1	-	+	+	-
2	-	+	-	-
3	-	+	-	+
4	-	-	-	+
5	+	-	-	+
6	+	-	-	-
7	+	-	+	-

Tabela 9: Sequência para meio passo no sentido anti-horário

Passo inteiro	Meio passo
Consome menos energia	Consome o triplo de energia
Gira mais rápido	Gira mais devagar
É mais simples	É mais complexo
Possui maior torque	Possui 30% menos torque
Possui menos precisão	Possui o dobro de precisão

Fonte: [Cardozo \(2012\)](#)

Verifica-se que o modo passo inteiro consome menos energia e maior torque em relação ao meio passo, porém possui menos precisão, sendo assim, deverá ser avaliado para cada aplicação a melhor opção, de acordo com os objetivos a serem satisfeitos. O modo de micro-passo também é uma opção, porém exige um controle mais complexo e para a aplicação aqui proposta não são exigidos passos dessa ordem. Podendo ser aplicados os modos anteriores.

Até o momento foi dado o referencial teórico necessário para implementar o protótipo de concentrador solar do tipo refletor linear fresnel. O capítulo seguinte traz os materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos específicos do trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve as etapas realizadas para obtenção dos objetivos específicos. Os passos seguidos são mostrados na figura 38.

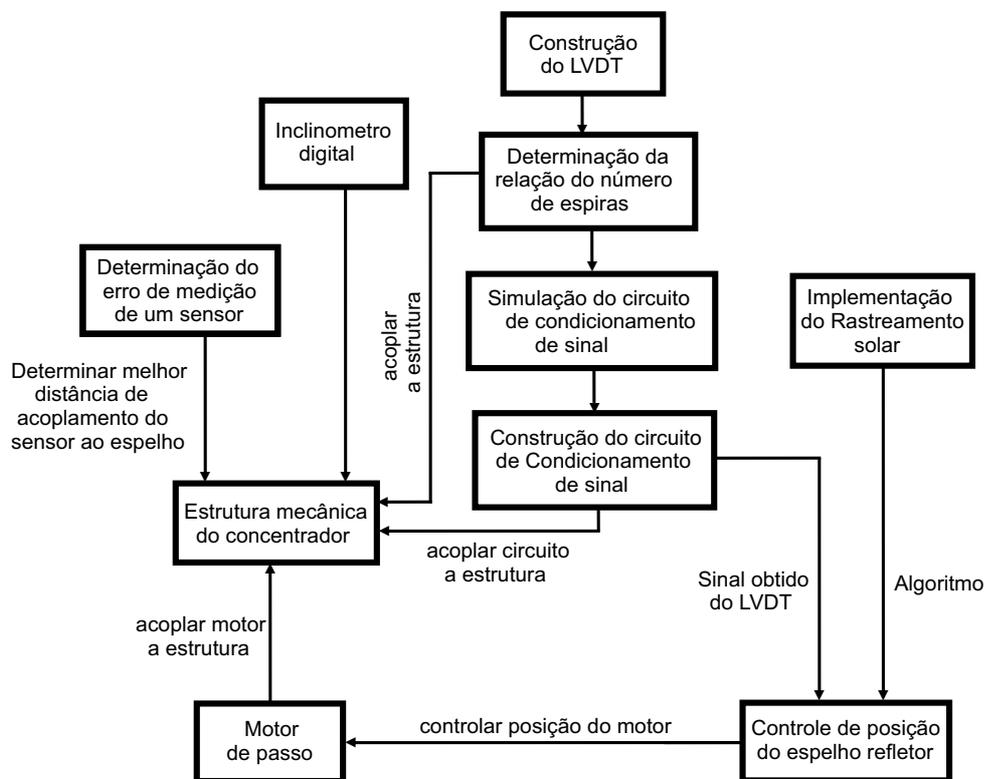


Figura 38: Etapas da pesquisa

Na seqüência foram descritos os procedimentos utilizados para implementação das diferentes etapas do projeto de construção do protótipo de concentrador solar do tipo fresnel linear. Foram abordados: a construção da estrutura do sistema refletor, os procedimentos utilizados para simular o rastreamento solar e para determinação do erro de medição do sensor na inclinação do espelho. Com relação ao sensor de posição, foram mostrados: os procedimentos de construção do sensor, a construção do circuito de condicionamento e os resultados experimentais. Por fim, para o sistema completo, o controle de posição do espelho refletor.

3.1 CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA DO SISTEMA REFLETOR

A construção da estrutura se fez necessária para permitir a conexão dos elementos motor, sensor e espelho. Uma das características requeridas foi a robustez, para evitar desvios angulares devido a estrutura. Desta forma, foi construída uma estrutura metálica soldada, alinhada com ângulos devidamente projetados. A altura escolhida foi para permitir um fácil manuseio e a inserção do sensor LVDT abaixo do quadro. Foram soldados dois mancais, alinhados no centro da geometria. O quadro do espelho foi construído com perfil de cantoneira, que atribui rigidez ao sistema. A estrutura possui 60 cm de comprimento, 20 cm de largura e 80 cm de altura. Utilizou-se um motor de passo para mover o espelho. Seu acoplamento foi feito através de engrenagens. O desenho da estrutura, implementado no solidworks, é mostrado na figura [39](#).

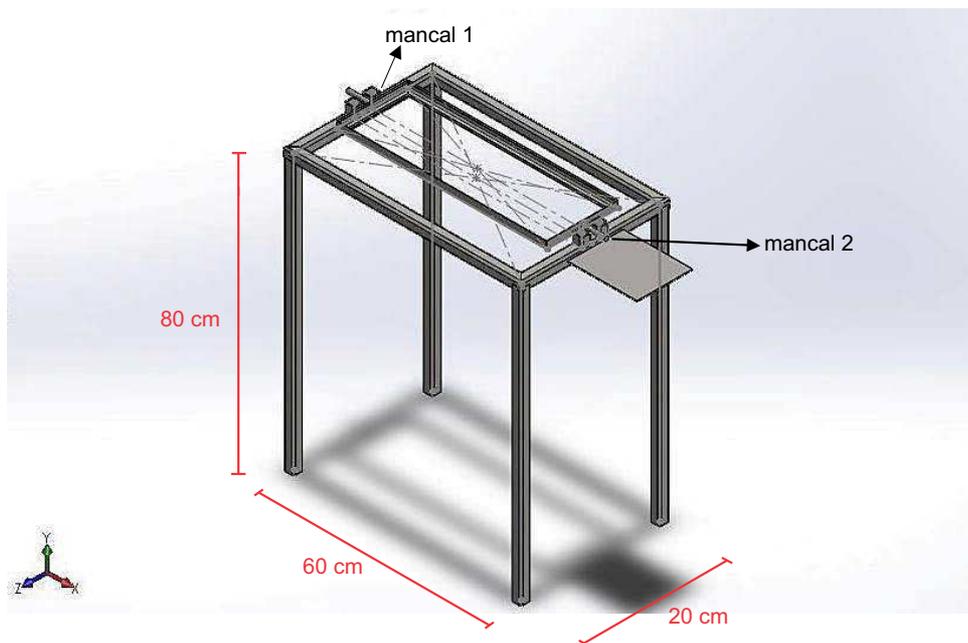


Figura 39: Desenho da estrutura de suporte para o espelho refletor e sensor LVDT

A construção da superfície receptora será foco de trabalhos futuros.

3.2 TRANSDUTOR LVDT

3.2.1 Construção do transformador diferencial

O esboço do LVDT construído é mostrado na figura 40. Possui 23 cm de comprimento, divididos em 3 bobinas de 7 cm cada e 4 paredes do carretel, com 0,5 cm cada. Essas dimensões foram projetadas para que o sensor tivesse 7 cm de deslocamento, suficiente para realizar a leitura de posição do espelho refletor durante todo o processo de rastreamento solar. Com relação a largura, foram utilizadas medidas que facilitassem a usinagem das peças. O núcleo possui 14,5 cm de comprimento, suficiente para cobrir duas bobinas e a parede que as separa. Para seu manuseio utiliza-se uma haste de aço inox.

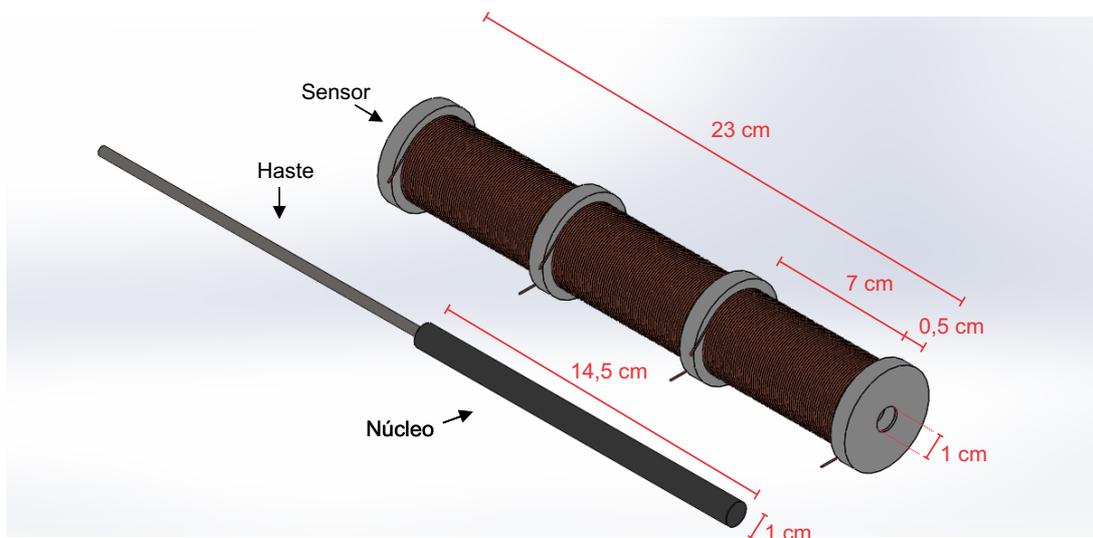


Figura 40: Esboço do sensor LVDT construído

O carretel foi construído de polipropileno, e a figura 41 mostra sua usinagem. As bobinas foram confeccionadas com fio de cobre esmaltado de 27 AWG. As bobinas secundárias foram confeccionadas com 3000 espiras e a primária com 1500. Para o núcleo, o material escolhido foi ferrite.

A figura 42 apresenta o carretel já com as espiras de fio de cobre. As bobinas secundárias foram enroladas de forma a ficar em série entre si.

A figura 43 mostra as bobinas envolvidas com fita crepe, com o objetivo de pressionar e evitar que os fios se deslocassem, o que ocasionaria variação da indutância. O núcleo de ferrite foi encapsulado em uma capa de nylon que possui em

uma das extremidades um encaixe, para que pudesse ser acoplado a haste de aço inox.

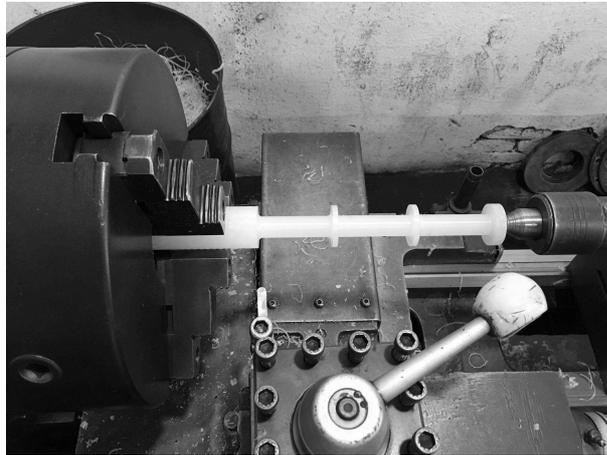


Figura 41: Usinagem do sensor



Figura 42: Sensor construído



Figura 43: Sensor envolvido com fita e núcleo

No centro do sensor existe um furo, que vai de uma extremidade a outra, para que o núcleo possa ser deslocado em seu interior, como é apresentado na figura

44.**Figura 44: Núcleo posicionado no interior do LVDT**

O sensor foi blindado, utilizando tubo de aço inox, para que não sofresse interferências elétricas e físicas do meio externo. A figura **45** exibe a carcaça utilizada, assim como: duas peças de nylon, que tem a função de acoplar o sensor ao tubo; e tampas de inox, necessárias para selar o LVDT dentro da estrutura.

**Figura 45: Tubo de aço inox para blindagem e peças de encaixe e selagem**

A figura **46** mostra o sensor no interior da carcaça. Através de um furo, feito na lateral, saem os cabos das bobinas e do sensor Im35, instalado para monitoramento da temperatura do LVDT. Para que as cargas estáticas acumuladas na carcaça e haste do sensor pudessem ser escoadas, essas estruturas foram aterradas.

A próxima seção trata dos parâmetros utilizados para definir o número de espiras das bobinas, baseado em modelagem já vista anteriormente.



Figura 46: Sensor com carcaça de inox

3.2.2 Determinação da relação do número de espiras

Através da modelagem utilizando os dados geométricos do sensor, mostrada na seção 2.4.4, foi possível fazer um estudo no matlab/simulink para verificar a tensão de saída do LVDT, variando-se o número de espiras das bobinas e mantendo a relação entre a bobina primária e as secundárias. A tabela 10 mostra as simulações e os resultados para cada caso são mostrados na tabela 11. Além desses resultados foram obtidos outros, com um menor número de espiras. Porém, como visto na seção 2.4.1.2, um pequeno número de camadas diminui a interação do fluxo concatenado e a indutância da bobina se torna baixa, já um número alto acrescenta muita indutância, além de, capacitância parasita ao circuito, reduzindo a frequência de ressonância. Através da modelagem utilizando os dados geométricos não é possível obter a capacitância da bobina, tão pouco, a frequência de ressonância. O que significa que é necessário observar na prática a frequência de ressonância, e assim, escolher um valor para o número de espiras, buscando que seja o maior possível. Para as simulações foi utilizado como limite superior os valores apresentados no LVDT comercial dado por Misra *et al.* (2014). O núcleo aqui implementado possui diâmetro superior ao do trabalho citado, gerando maior indutância, por isso utilizou-se um número um pouco menor de espiras no secundário (300) em relação a pesquisa utilizada para comparação.

Verifica-se que as simulações foram feitas considerando o núcleo posicionado nas posições de -20 mm, -10 mm, 0 mm, 10 mm e 20 mm. A faixa total vai de -35 mm a 35 mm. As simulações também poderiam ser realizadas em outros pontos, desde que a verificação da resposta fosse realizada no mesmo ponto nos 5 casos. A variação máxima de tensão entre as simulações ocorreu comparando a simulação 1 e

5, 1,45 mV. Isso mostra que, mantendo-se a relação entre as bobinas secundárias e primária o valor não vai variar consideravelmente.

Tabela 10: Configurações utilizadas em cada simulação da modelagem geométrica

Simulação	Bobina primária (espiras)	Bobinas secundárias (espiras)
1	500	1000
2	750	1500
3	1000	2000
4	1250	2500
5	1500	3000

Tabela 11: Tensão de saída obtida para os diferentes casos utilizando a modelagem geométrica

Simulação	Tensão				
	-20 mm (mV)	-10 mm (mV)	0 mm (mV)	10 mm (mV)	20 mm (mV)
1	-123,95	-53,38	0,04	53,49	124,14
2	-123,42	-53,19	0,04	53,30	123,60
3	-123,03	-53,06	0,04	53,17	123,22
4	-122,74	-52,96	0,04	53,07	122,93
5	-122,5	-52,87	0,04	52,98	122,69

Como, de acordo com a modelagem abordada, esse fator não é significativo para a escolha, o número de espiras escolhido para as bobinas levou em consideração a forma como o sensor está ligado ao circuito. Durante os testes experimentais utilizou-se um amplificador operacional acoplado na entrada da bobina primária, como mostrado anteriormente na seção [2.4.5](#). Este amplificador tem uma resistência de saída de 70 Ω . A maior porcentagem de energia da fonte deve ser dissipada sobre o sensor, e não sobre o amplificador. Assim, deve-se utilizar um número grande de espiras. Quanto maior o número de espiras na bobina primária, maior será a impedância da bobina, e menor será a porcentagem total da queda de tensão sobre o amplificador. Além disso, um maior número de espiras contribui para minimizar os efeitos da variação da temperatura na tensão de saída.

Ainda através da modelagem utilizando os dados geométricos obteve-se o valor da indutância no primário para as diferentes simulações. Os resultados são mostrados na tabela [12](#).

Não há na literatura uma modelagem para determinar a frequência de ressonância do LVDT sem realizar ensaios. Na prática os valores dados na simulação 5 proporcionaram um valor da frequência de ressonância de aproximadamente 20Khz, 10 vezes acima da frequência de excitação da bobina, esta configuração foi utilizada neste trabalho. Então foram feitos ensaios experimentais com o sensor construído, para obter suas características e simular sua resposta com o circuito de condicionamento. Os resultados são mostrados na subseção 4.2.1.1. Após definir o número de espiras e obter as características elétricas do sensor construído foi possível construir o circuito de condicionamento de sinal.

Tabela 12: Indutância na bobina primária no momento em que o núcleo está posicionado no centro do carretel

Simulação	Indutância no primário (mH)
1	30,61
2	68,87
3	122,44
4	176,31
5	275,5

3.2.3 Circuito de condicionamento

A leitura direta da tensão de saída do LVDT, além de conter ruídos, não fornece informação precisa com relação a posição do núcleo, pois, partindo do ponto zero (ponto central), quando o núcleo é deslocado para um dos dois lados, o módulo da tensão será o mesmo, apenas a fase varia de um lado para o outro. Dessa forma, é necessário fazer a demodulação do sinal, de forma a utilizar a fase para determinar a posição do núcleo. A demodulação possibilita que o módulo da tensão represente a posição do núcleo, em todo o percurso do sensor e o filtro elimina as harmônicas e a frequência da portadora. A demodulação do sinal do sensor pode ser feita de forma síncrona ou assíncrona.

Existem circuitos integrados no mercado para realização da demodulação síncrona, como o NE5521D e o AD698, por este motivo esta técnica foi escolhida. Para esta pesquisa foi utilizado o NE5521D, por ter menor custo e atender aos requisitos necessários, ou seja, possuir circuito oscilador e demodulador. Um circuito auxiliar, contendo avanço de fase e filtro foi adicionado. A montagem pode ser vista na

figura 47. O avanço de fase, o oscilador e o filtro passa-baixas foram implementados baseados em Dias (2015) e no datasheet do NE5521D.

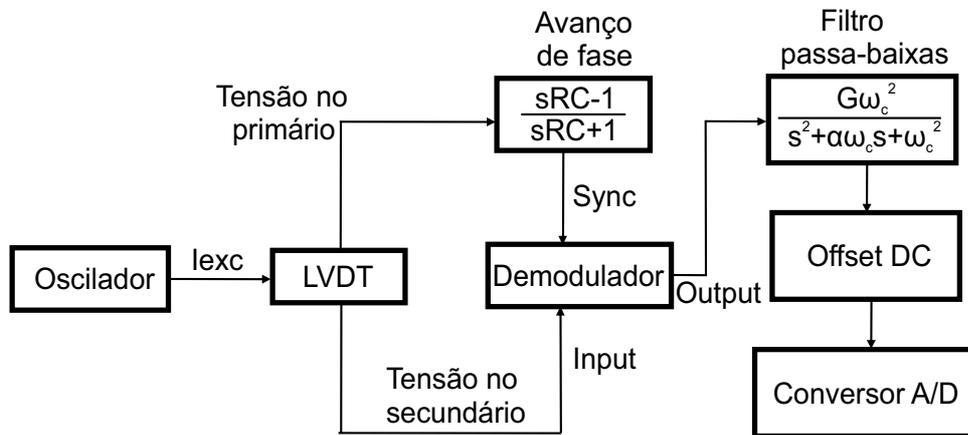


Figura 47: Diagrama do circuito de condicionamento

A corrente de excitação I_{exc} , proveniente do oscilador, é limitada pelo resistor R , em série com o primário do LVDT. Essa corrente percorre a bobina primária do sensor, o que gera uma tensão aos terminais do secundário. A tensão do primário é defasada, em relação ao secundário. Portanto, é necessário adicionar um circuito para avanço de fase, dando origem a tensão $Sync$. Isso é necessário pelo fato do NE5521D funcionar apenas com demodulação síncrona, ou seja, exigir que as tensões do primário e secundário estejam em fase para realizar a retificação. Isso reduz a tensão residual quando o núcleo está posicionado no centro (ZAHID, 1988). Posteriormente a tensão é filtrada, utilizando-se um filtro passa-baixas de segunda ordem, como indicado no datasheet do NE5521D.

3.2.3.1 Ajuste de tensão para leitura pelo conversor A/D

Para que a tensão do sensor possa ser lida através de um microcontrolador é necessário ajustar o valor de tensão para que fique dentro da faixa de leitura do conversor A/D do dispositivo em questão. Para isso utilizou-se a configuração mostrada na figura 48. O amplificador operacional utilizado foi o LM6171 da *Texas Instruments*, que possui baixa distorção, slew rate de $3600V/\mu s$ e CMRR de $110dB$.

O divisor de tensão, na entrada do circuito, faz com que a fonte V_f entregue uma tensão V_b ao buffer. A equação que determina o valor dessa tensão é dada por:

$$V_b = \frac{V_f R_2}{R_1 + R_2}. \quad (53)$$

A tensão V_s proveniente do sensor, que varia de -1 V a 1 V, é somada a V_b , esse processo faz com que o valor de V_n seja sempre positivo. V_n é definido por:

$$V_n = \frac{2}{3}(V_s + V_b). \quad (54)$$

O ajuste de tensão é dado na última etapa do circuito, implementando-se um ganho de tensão. Dessa forma, a tensão de saída V_o é determinada por:

$$V_o = \frac{V_n(R_3 + R_4)}{R_4}. \quad (55)$$

A entrada do A/D receberá a tensão V_o , que varia de 0 a 3,15 V, de acordo com a posição do núcleo. Cada valor de tensão correspondente foi associado a uma posição angular do espelho.

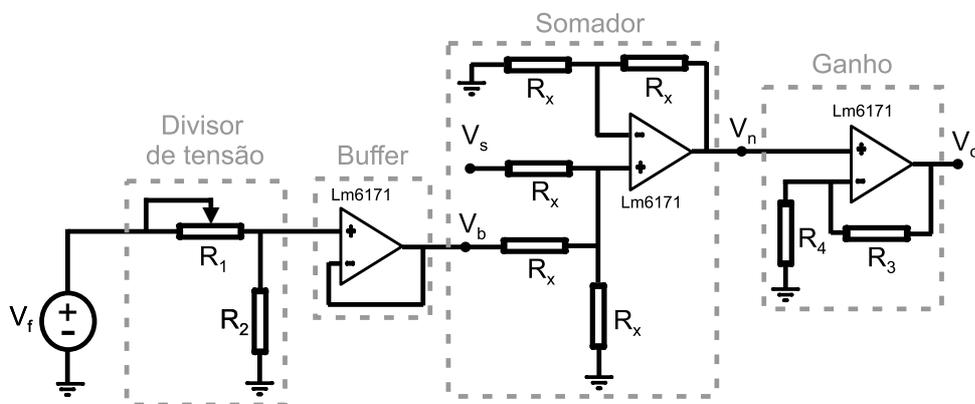


Figura 48: Circuito para ajuste de tensão para leitura pelo A/D

Com estas etapas já implementadas foi possível realizar os experimentos para verificar a influência da temperatura no comportamento do transdutor. A próxima etapa aborda este assunto.

3.2.4 Estudo da influência da variação de temperatura na tensão de saída

Pelo fato do concentrador solar ficar exposto a variações de temperatura do ambiente, foi necessário verificar na prática a influência que esse fator tem no LVDT. Então, utilizou-se um soprador térmico para aquecer a carcaça do sensor.

A carcaça foi presa a uma estrutura de madeira através de abraçadeiras de nylon. Em suas extremidades inferior e superior foram pregadas peças também de madeira, fazendo com que o sensor ficasse completamente imóvel. Carcaça e haste foram aterradas, impedindo que interferências externas sobre essas estruturas influenciassem nas medições. A montagem utilizada para realização dos experimentos de variação de temperatura e precisão do transdutor é mostrada na figura 49.

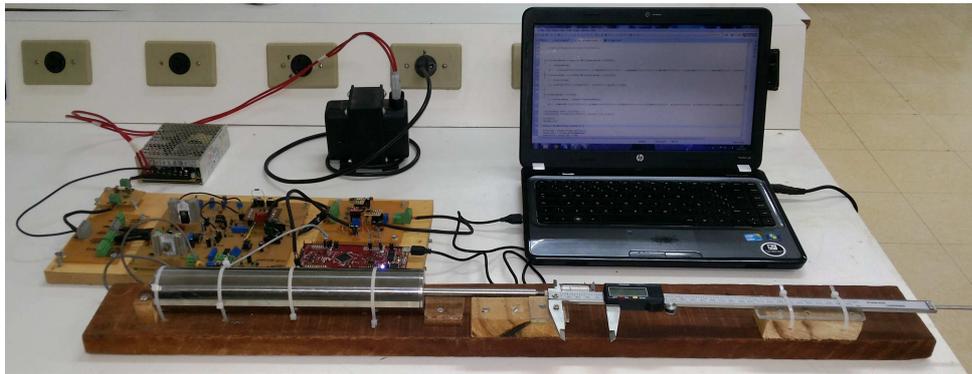


Figura 49: Montagem para realização de experimentos com o transdutor

A fim de obter a curva de calibração do LVDT foi utilizado um paquímetro digital de aço inox com lcd eletrônico. O alcance de medição do instrumento é 300 mm, com exatidão de 0,02 mm até 100 mm e 0,03 mm de 100 a 300 mm. O instrumento foi preso, através de abraçadeiras, a uma estrutura de madeira, de forma a ficar totalmente firme e alinhado para ser acoplado com a haste do sensor.

O sensor de temperatura lm35, indicado para aplicações entre -55 °C e 150 °C, foi posicionado no interior da carcaça do LVDT, para verificação da temperatura durante os testes.

O soprador térmico foi posicionado de forma a aquecer toda a carcaça. Foram feitas 5 excursões da haste, do início ao fim do carretel, um para cada temperatura verificada. A ordem seguida foi: 33 °C, 36 °C, 40 °C, 45 °C e 50 °C. Esse intervalo de temperatura foi utilizado, pois em uma situação real, levando em consideração a localidade em questão e o fato de o concentrador ficar exposto ao sol, é provável que o equipamento opere dentro desta faixa. Durante cada um dos testes a regulagem de temperatura do soprador foi feita manualmente, buscando manter a variação inferior a 1 °C.

Após o estudo da influência da temperatura iniciaram-se os experimentos

para averiguar a precisão do transdutor construído. Este assunto é tratado na próxima seção.

3.2.5 Obtenção da precisão do transdutor construído

Para calibrar o sensor construído foram feitos experimentos utilizando a mesma montagem mostrada na seção anterior. O núcleo foi posicionado na extremidade inferior e foi deslocado manualmente em intervalos de 1 mm até o fim do percurso. Esse processo foi repetido dez vezes, o que permitiu obter dez curvas relacionando a tensão medida e o deslocamento dado pelo paquímetro. Em cada um dos casos, através da ferramenta “Basic Fitting” foi possível gerar o polinômio que representa a curva de calibração “tensão x posição” do LVDT. As curvas geradas pelos polinômios (P1 a P10) são mostradas na figura 50.

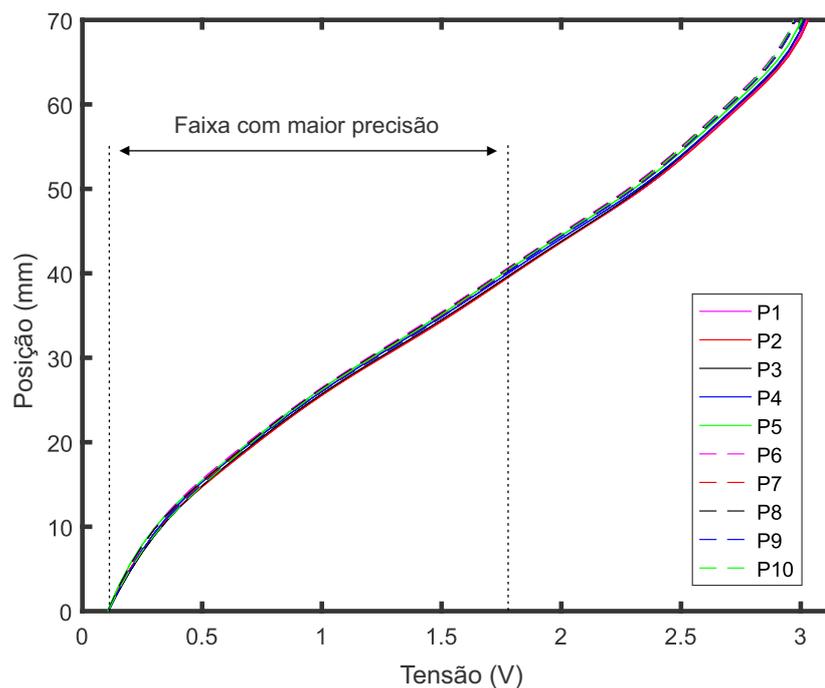


Figura 50: Polinômios que representam a curva de calibração “tensão x posição” do LVDT

Com os dez polinômios gerados foi obtido o polinômio médio. E então foi calculado o desvio padrão para cada ponto medido, em toda a faixa do LVDT, com o objetivo de determinar sua precisão.

Posteriormente aos testes de precisão o sensor foi acoplado ao refletor, este assunto é abordado na próxima seção.

3.2.6 Acoplamento do LVDT ao eixo do espelho

O acoplamento do sensor à estrutura foi feito por meio de uma polia, como pode ser visto na figura [51](#).

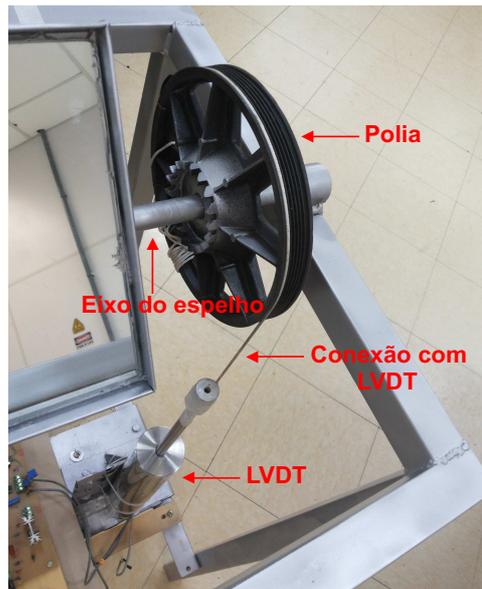


Figura 51: Acoplamento do sensor a polia

Isso possibilitou que o peso da haste fosse aproveitado para compensar a folga entre os dentes da engrenagem. O sensor foi preso a polia através de uma corda de nylon, que possui resistência a tração, durabilidade e não deforma elasticamente com as tensões aplicadas. A polia foi acoplada ao eixo do espelho, sofrendo as mesmas influências de variação angular no momento em que o motor é acionado.

3.3 DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ERRO DE MEDIÇÃO DO SENSOR NA INCLINAÇÃO DO ESPELHO

Para gerar o gráfico do erro de inclinação ($\Delta\gamma$) causado pelo erro de medição de posição do sensor (Δf), para uma distância de acoplamento (L_a), foram utilizados os seguintes dados de entrada: L_a , variando de 8.5 cm à 50 cm; um ângulo γ fixo; e Δf , em milímetros. Assim como, a equação [24](#), previamente implementada no matlab. Para demonstrar a variação de $\Delta\gamma$, em função do valor de Δf , o estudo foi feito para 5 diferentes valores de Δf : 0,5 μm , 50 μm , 150 μm , 300 μm e 500 μm . Para a análise foi utilizado $\gamma = 45^\circ$, limite em que se deseja fazer o processo de rastreamento. O ângulo

escolhido é o pior caso possível dentro da faixa escolhida, que vai de 0° à 45° , pois em relação ao erro de inclinação no seguimento solar, quanto maior o ângulo, maior o erro associado para o mesmo valor de Δf . O mesmo teste foi feito para $\Delta f = 160 \mu$, que é a precisão do LVDT construído. O esquema, com as respectivas variáveis correspondentes, foi mostrado anteriormente, na subsecção 2.2.5, figura 18.

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO PROCESSO DE RASTREAMENTO SOLAR

Para implementar o processo de rastreamento solar foi utilizado o software matlab. Foi implementado um vetor para representar a hora local padrão, de 09:00 às 16:00, este valor é atualizado a cada 10 segundos para o cálculo da hora solar aparente, dada pela equação 4.

Os dados de entrada comuns, utilizados para as análises de rastreamento descritas aqui são: dia do ano, latitude local, longitude local, longitude padrão, horário, altura de instalação do receptor e distância horizontal entre receptor e espelho refletor.

Para gerar k , ângulo entre um eixo paralelo à linha Leste-Oeste e os raios solares, e γ , ângulo que o espelho deve ter para que a radiação incida sobre o receptor, utilizou-se os dados de entrada comuns, assim como, as equações 11 e 14, respectivamente, previamente implementadas no programa de simulação utilizado. Para demonstrar a variação dos ângulos k e γ , em função do dia do ano, o estudo foi feito para 2 dias, 31/05/2016 e 15/07//2016, para a localidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil, latitude $26^\circ 11' 50''$ Sul, longitude $52^\circ 41' 26''$ Oeste.

Para verificar a influência da distância entre espelho refletor e receptor com o aumento da dispersão da radiação refletida, foram feitas novas simulações utilizando os dados de entrada comuns e acrescentando a largura do espelho refletor. Através da equação 15 foi possível determinar a largura do feixe de radiação que chega ao receptor. As simulações foram feitas em intervalos de 0,5 metros, entre os limites de 0,5 à 2 metros de distância do receptor, que estava localizado a 3,47 metros de altura. Para a análise considerou-se um espelho plano de 20 cm de largura. Após plotar estes resultados verificou-se que um receptor com 30 cm de largura seria suficiente para capturar toda a radiação incidente, para um sistema sem erro de posição angular.

Posteriormente foi feito novo estudo para determinar a influência do parâmetro “altura do receptor” na quantidade de radiação que deixa de incidir sobre o

receptor quando o espelho tem um erro de inclinação. Os dados de entrada comuns foram utilizados para o teste de espalhamento da radiação (que varia com a altura de instalação do receptor), acrescentando-se ainda a largura do receptor e um intervalo de erro de inclinação do espelho, assim como, a equação 23. Os testes foram feitos para erros que variavam de $0,2^\circ$ à 1° , em intervalos de $0,2^\circ$. As alturas de instalação do receptor variaram de 1,5 metros à 6 metros, em intervalos de 0,5 metros. Estas simulações foram feitas para quatro distâncias entre espelho refletor e receptor, no eixo x, na faixa que vai de 0,5 m a 2 m, em intervalos de 0,5m. A ilustração desse sistema é mostrada na figura 52.

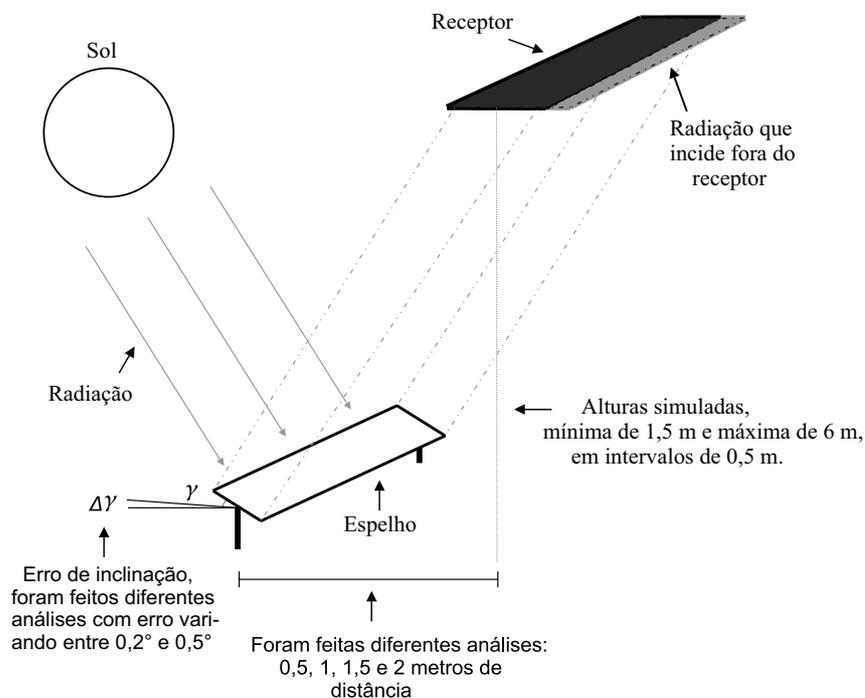


Figura 52: Análise realizada para diferentes erros de inclinação e altura do receptor

Outra simulação foi feita, no matlab, mantendo a altura fixa em 3,47 metros, variando-se a distância entre espelho e refletor. Os testes foram feitos em intervalos de 0,5 metros, entre os limites de 0,5 à 2 metros de distância do receptor, para valores de $\Delta\gamma$ variando entre $0,2^\circ$ e $0,5^\circ$.

Todos os resultados referentes as simulações citados anteriormente são mostrados na seção 4.4.

O valor de $\Delta\gamma$ se deve ao erro proveniente da leitura de posição do sensor de posição (Δf).

3.5 CONTROLE DO PROCESSO DE RASTREAMENTO SOLAR

O fluxograma da figura 53 ilustra como é feito o controle do processo de rastreamento solar.

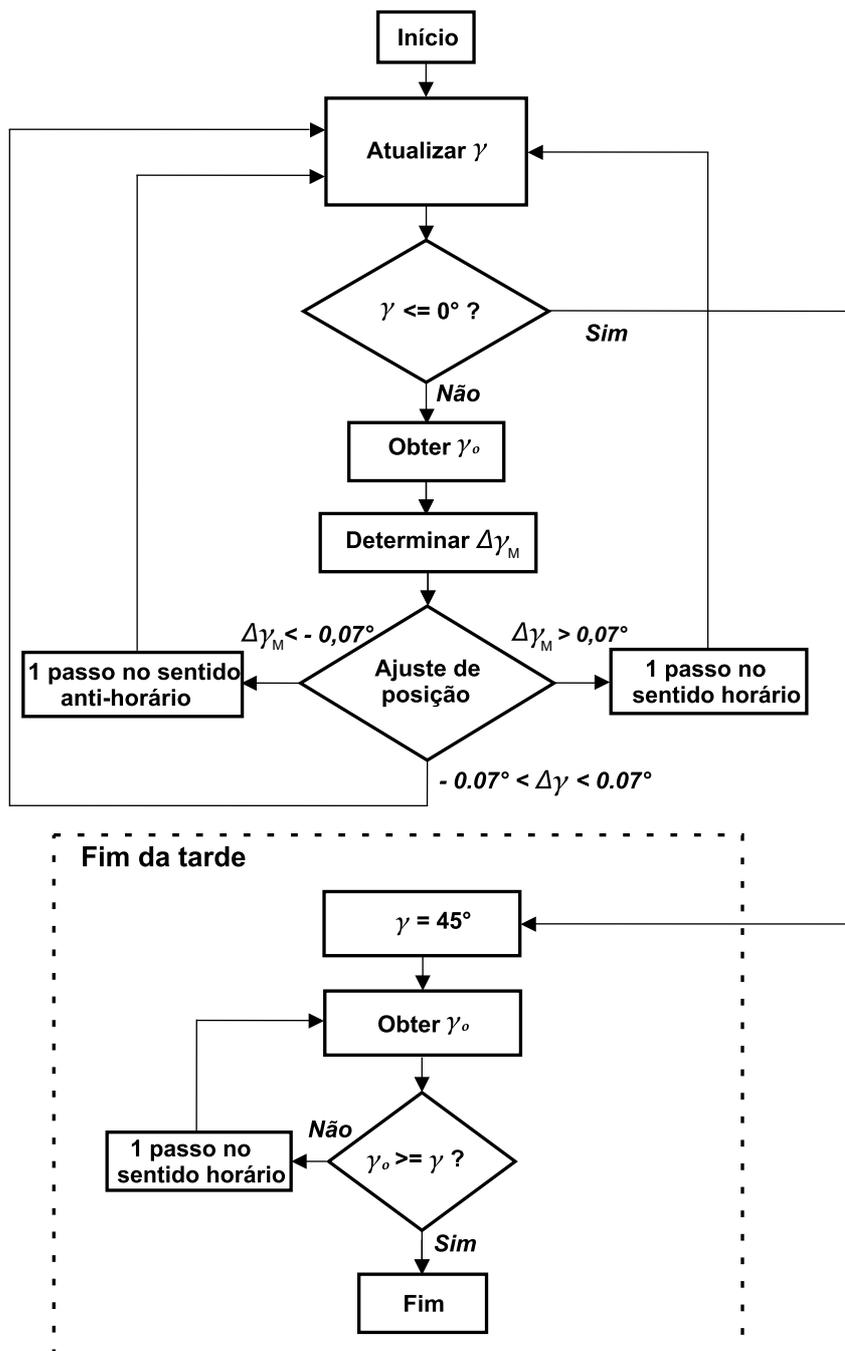


Figura 53: Fluxograma do sistema de rastreamento

No momento em que o sistema entra em funcionamento o valor de re-

ferência γ é atualizado, este ângulo é baseado no algoritmo de rastreamento solar e define a posição em que o espelho deve estar para que toda a radiação refletida atinja o receptor.

Posteriormente o A/D do microcontrolador recebe a tensão proveniente do LVDT, que varia de acordo com a posição do núcleo. O valor obtido é utilizado para o cálculo do polinômio de calibração do transdutor (γ_o). Quando γ for igual a 0° o rastreamento solar chega ao fim. Caso contrário, será feita a leitura do ângulo atual do espelho γ_o , proveniente do sensor. Se o erro for maior que o $\Delta\gamma_M$ ($\gamma - \gamma_o$) permitido o motor irá atuar, dando: um passo no sentido anti-horário, caso a diferença seja negativa, ou no sentido horário, caso a diferença seja positiva. Se o erro for grande o processo se repetirá, até que $\Delta\gamma_M$ volte a faixa mínima.

O diagrama de blocos simplificado do sistema de rastreamento é mostrado na figura 54. A equação 14, que determina o valor de γ , é implementada no microcontrolador e serve de referência para a posição angular do espelho refletor ao longo do dia. A equação polinomial gera o ângulo γ_o , a partir do sinal originário do transdutor. O controle atua sobre o sistema de movimentação do espelho (motor de passo acoplado as engrenagens) nos momentos em que o $\Delta\gamma_M$ excede os limites estabelecidos no fluxograma anterior, caso contrário, o espelho permanece imóvel.

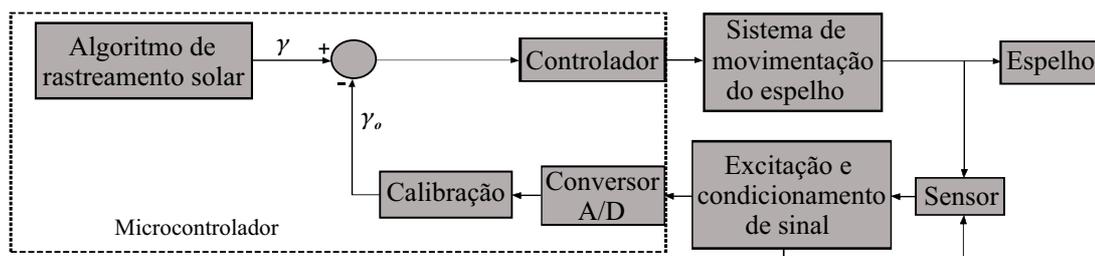


Figura 54: Diagrama do sistema para rastreamento solar

Percebe-se que o bom funcionamento do sistema mecânico é fundamental para que o controle atinja a precisão requerida, dessa forma, a próxima seção aborda: o driver utilizado para o motor, o circuito responsável por isolar as partes de controle e potência e o projeto das engrenagens de redução da velocidade e aumento de torque do motor.

3.5.1 Motor de passo e caixa redutora de velocidade

O Driver para motor com ponte H L298N, mostrado na figura 55, foi utilizado para que fosse possível fornecer a corrente nominal ao motor de passo.

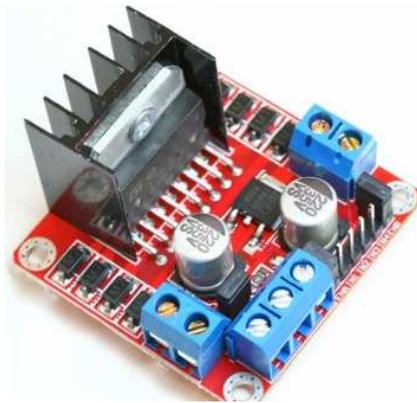


Figura 55: Driver para motor com ponte H L298N

Para isolar o circuito de controle do circuito de potência, 4 optoacopladores foram utilizados, um para cada terminal do motor de passo. O esquemático é mostrado na figura 56.

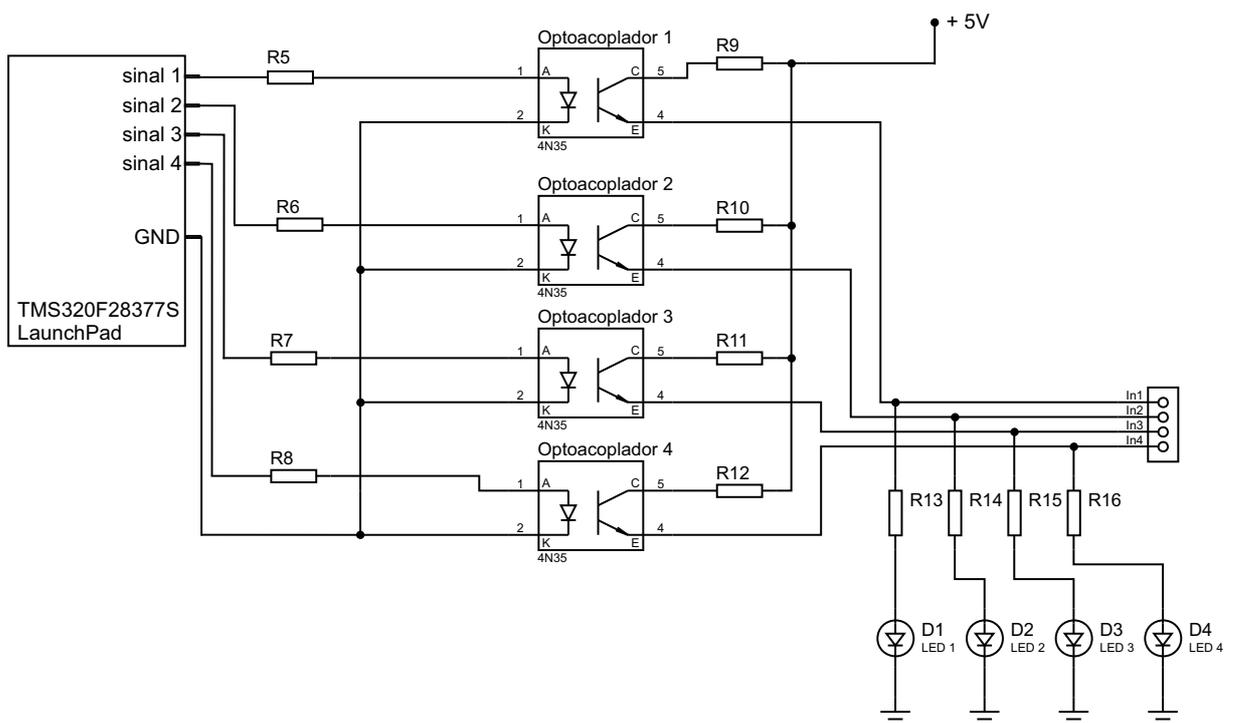


Figura 56: circuito que isola circuito de controle e de potência

O eixo do motor de passo utilizado gira $1,8^\circ$ para cada passo dado, valor alto se comparado com a velocidade de variação angular do sol em relação a terra ($0,25^\circ$ por minuto). Para que o rastreamento solar pudesse ser implementado com alta precisão foi necessário acoplar uma caixa de redução ao motor. O requisito de projeto era que o passo fosse inferior a $0,02^\circ$, para que o tamanho do passo do motor não limitasse a precisão do rastreamento. Utilizou-se um sistema com quatro engrenagens, dois pinhões com 16 dentes (1^a e 3^a) e duas coroas com 109 (2^a e quarta), como mostrado na figura [57\(a\)](#) e [57\(b\)](#).

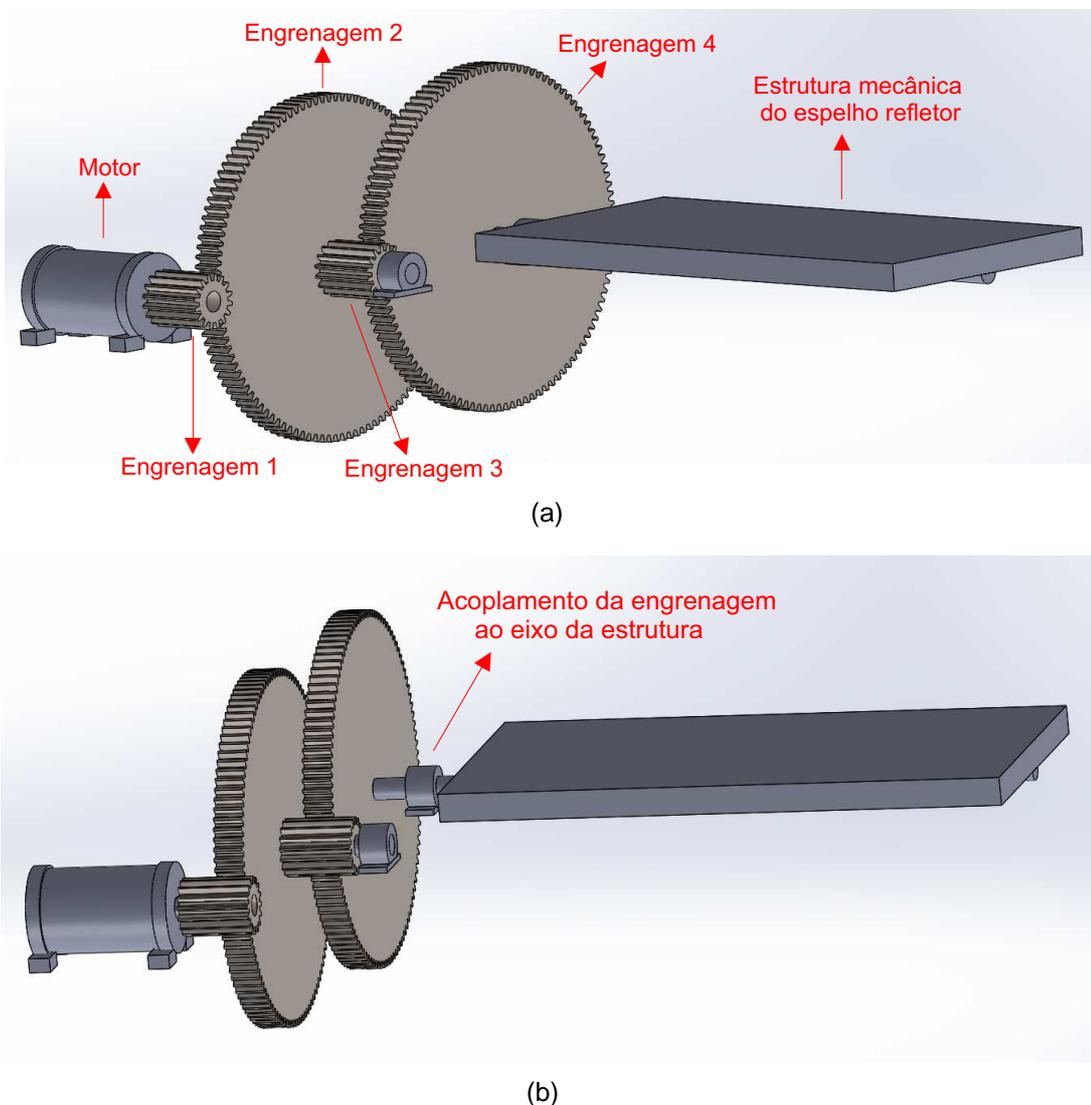


Figura 57: Caixa de redução. (a) Visão dos componentes, (b) Visão dos acoplamentos.

A primeira foi acoplada ao eixo do motor e ao eixo da segunda. A rotação no eixo da segunda é dada por:

$$R_{e2} = \frac{R_{e1}D_{e1}}{D_{e2}}, \quad (56)$$

sendo R_{e2} o passo no eixo da segunda engrenagem, R_{e1} o passo no eixo da primeira, D_{e1} o diâmetro da primeira e D_{e2} o diâmetro da segunda. A terceira engrenagem foi colocada no mesmo eixo da segunda, tendo portanto o mesmo passo. Foi então acoplada a quarta, e o tamanho do passo da engrenagem 4 é dado por:

$$R_{e4} = \frac{R_{e3}D_{e3}}{D_{e4}}. \quad (57)$$

Onde R_{e3} é a rotação da engrenagem 3, D_{e3} o diâmetro da engrenagem 3 e D_{e4} o diâmetro da engrenagem 4. Utilizando-se essa configuração conseguiu-se obter uma caixa de redução de 46.41 e passo de $0,019^\circ$.

Um fator que deve ser levado em consideração é que em um sistema com engrenagens existe uma folga (backlash) no acoplamento, como mostrado na figura

58.

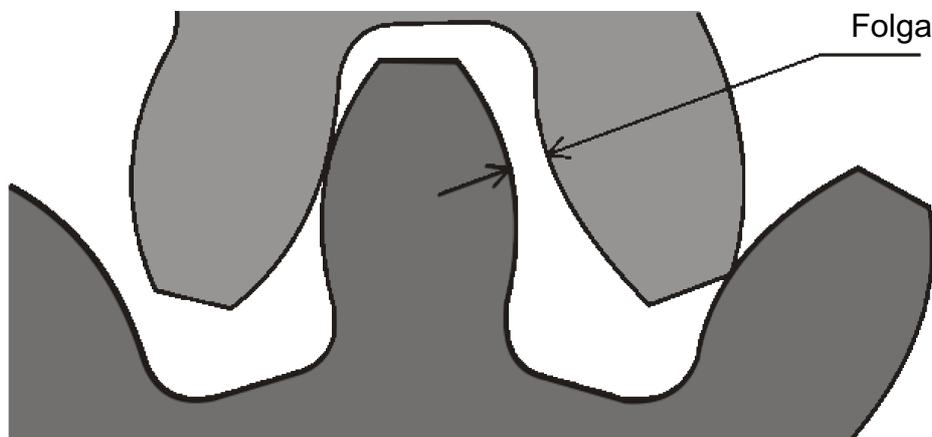


Figura 58: Folga entre os dentes das engrenagens

Fonte: **Cardozo (2012)**

O sistema proposto consegue compensar essa folga devido ao peso da haste do sensor, acoplado ao eixo do espelho, forçar os dentes das engrenagens entre si, evitando o movimento do dente no espaço da folga. Se durante o funcionamento do seguidor ocorrer alguma perturbação, o espelho é movido, acrescentando um erro angular ao sistema em um curto período de tempo. Porém o sistema de controle compensa nos momentos seguintes com passos auxiliares no motor.

3.5.2 Experimentos com sistema completo

Para realização dos testes experimentais com o protótipo de concentrador foi necessário acoplar o sensor a polia, instalada no eixo do espelho refletor. Para obter a curva de calibração “sinal do sensor x ângulo do espelho” inicialmente o espelho foi posicionado em 45° . Foram registrados os valores do ângulo e do sinal de tensão proveniente do sensor, posteriormente foram dados passos no motor até que a estrutura fosse deslocada em aproximadamente $0,4^\circ$ e novamente os dados foram anotados. O processo se repetiu no intervalo de 45° a 0° .

Para leitura do ângulo do espelho utilizou-se o inclinômetro digital DXL360S (mostrado na figura 59) com resolução de $0,01^\circ$ e precisão de $\pm 0,05^\circ$ no intervalo de 0° a 20° , $\pm 0,1^\circ$ entre 20° e 70° e $\pm 0,05^\circ$ entre 70° e 90° .



Figura 59: Inclinômetro digital DXL360S

Foi necessário realizar nova calibração, agora com o LVDT acoplado ao espelho refletor. Assim como foi feito no experimento para obtenção da precisão do transdutor, abordado na subseção 3.2.5, o núcleo do LVDT foi posicionado na extremidade inferior e seu deslocamento ocorreu de forma manual em intervalos de aproximadamente 1,15 mm até o fim do percurso. Para este caso porém, o valor de tensão medida foi relacionada com a posição angular do espelho, obtida com auxílio do inclinômetro digital. O processo foi feito dez vezes, obtendo-se dez polinômios que representam a curva “tensão x ângulo do inclinômetro”, através dos quais obteve-se o polinômio médio. As curvas obtidas através dos polinômios (P1 a P10) são mostradas na figura 60. Posteriormente determinou-se o desvio padrão das curvas em relação

ao polinômio médio.

Para este experimento o circuito de ajuste de tensão para leitura pelo A/D, dado anteriormente na figura 48, foi ajustado para que a tensão de saída varia-se de 0 a 3,15 V dentro da faixa de maior precisão, mostrada na figura 50. O trecho do sensor LVDT que se encontra fora desta faixa foi desconsiderado neste experimento.

O polinômio médio foi utilizado no experimento de rastreamento solar para indicar ao microcontrolador a posição angular do espelho. Foi possível, então, fazer o controle de posição, buscando manter a diferença entre a referência de posição angular e o ângulo do espelho o menor possível durante todo o funcionamento do protótipo.

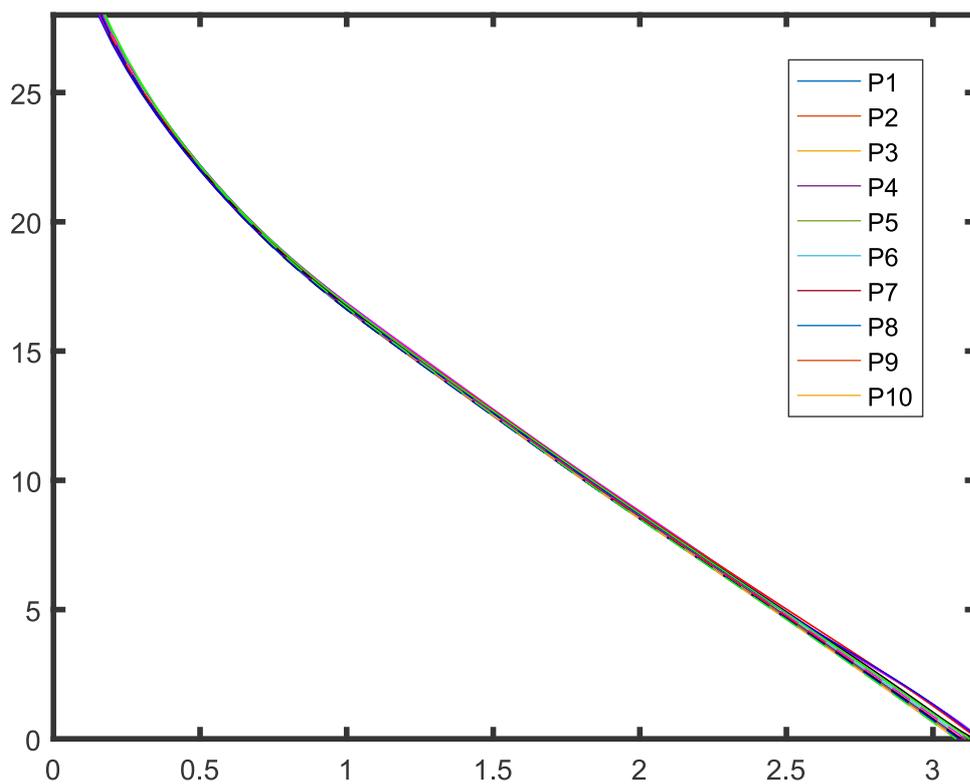


Figura 60: Inclinômetro digital DXL360S

Os materiais e métodos utilizados para a construção do protótipo de concentrador solar foram abordados. No próximo capítulo são expostos os resultados da pesquisa.

4 RESULTADOS

4.1 ESTRUTURA DO CONCENTRADOR SOLAR

A estrutura mecânica do protótipo de concentrador solar é mostrada na figura [61](#). Foram acoplados à estrutura todos os componentes necessários para o funcionamento do concentrador solar: Espelho, motor, transdutor e componentes eletrônicos.

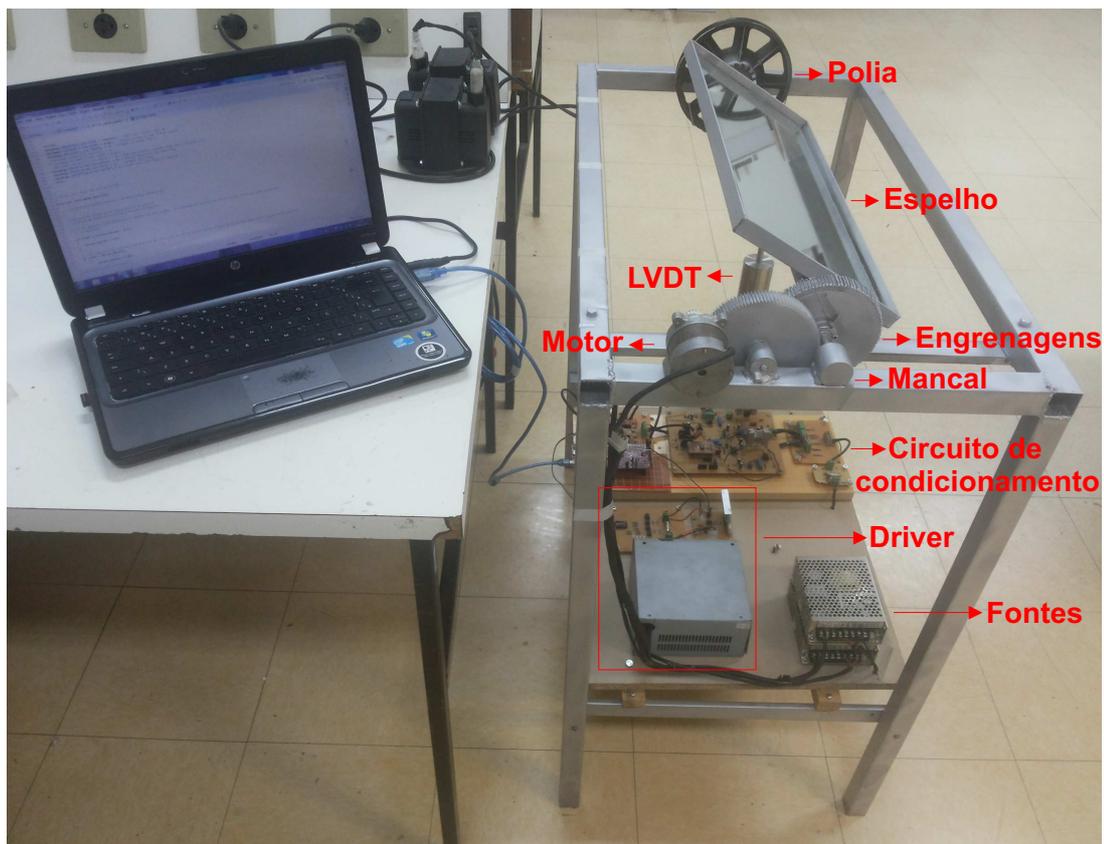


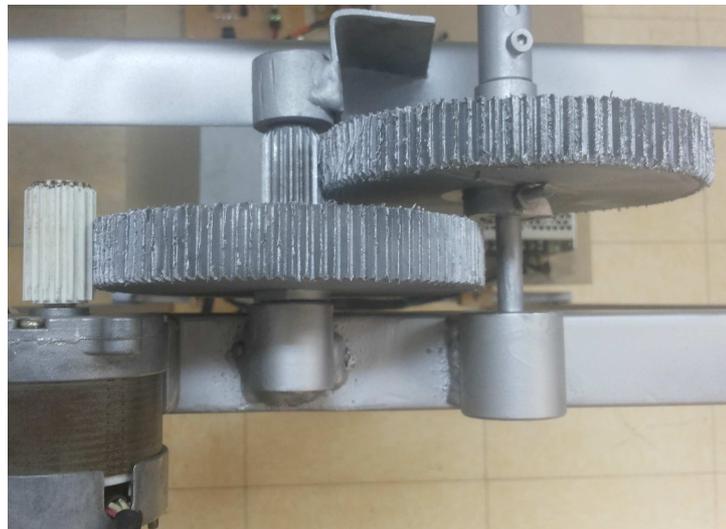
Figura 61: Espelho refletor e estrutura de suporte

Devido as dimensões do protótipo, o espelho utilizado é pequeno, o que inviabiliza aplicação de método para curvar sua superfície, por isso foi utilizado em sua forma plana.

Os detalhes da caixa de redução são mostrados nas figuras [62\(a\)](#) e [62\(b\)](#).



(a)



(b)

Figura 62: Caixa de redução. (a) Visão frontal, (b) Visão superior.

4.2 ANÁLISE DO TRANSDUTOR

Esta seção traz os resultados obtidos de condicionamento de sinal, variação de temperatura e precisão do sensor.

4.2.1 Condicionamento de sinal

As etapas do circuito de condicionamento de sinal foram simuladas e posteriormente implementadas. Os principais resultados obtidos são mostrados na próxima subseção.

4.2.1.1 Validação do circuito de condicionamento

O circuito de condicionamento de sinal foi modelado e simulado no simulink/matlab. A figura 63 mostra o valor simulado de Sync (tensão nos terminais do primário após sofrer avanço de fase) e dos terminais do secundário, quando o núcleo é posicionado em um dos extremos do sensor. A figura 64 apresenta os resultados experimentais.

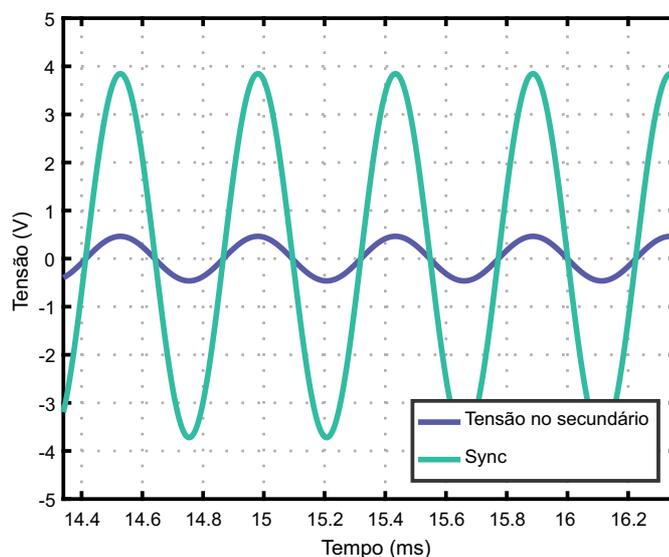


Figura 63: Valores de Sync e dos terminais do secundário. Resultado resultado de simulação. Para este caso o núcleo foi posicionado em uma das extremidades do sensor

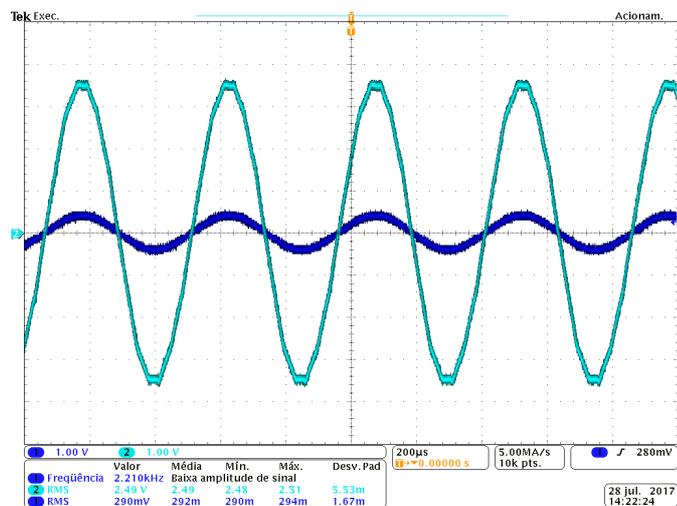


Figura 64: Valores de Sync e dos terminais do secundário. Resultado experimental

As figuras 65 e 66 apresentam os resultados de simulação e experimentais,

respectivamente, das tensões na entrada e saída do demodulador. Ou seja, a tensão nos terminais do secundário antes e depois de sofrer a retificação em onda completa.

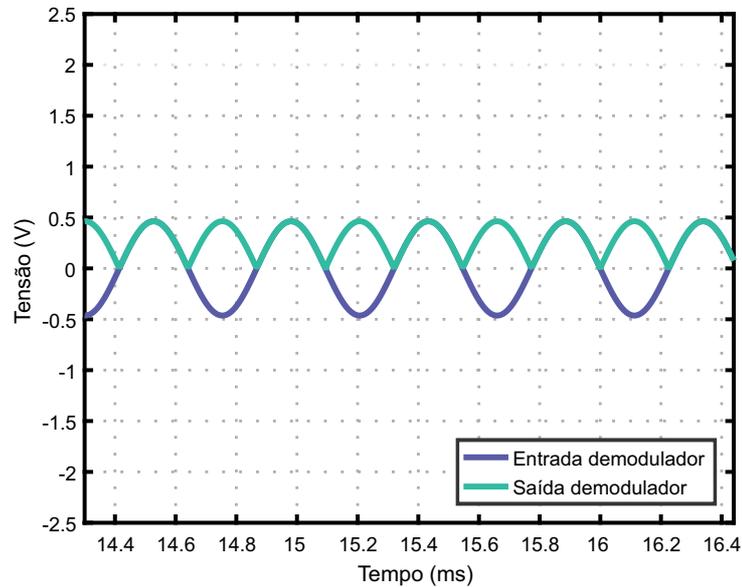


Figura 65: Valores nas saídas do demodulador e do filtro. Resultado de simulação

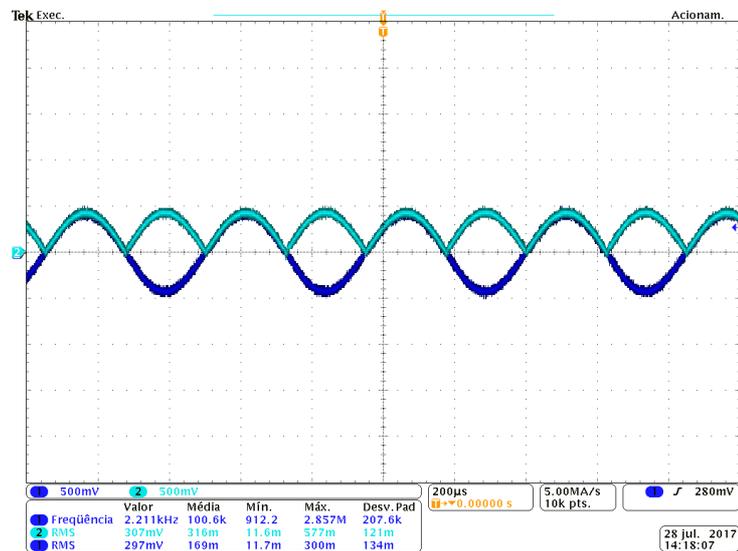


Figura 66: Valores na entrada e saída do demodulador. Resultado experimental

As figuras 67 e 68 apresentam os resultados de simulação e experimentais, respectivamente, da tensão contínua, obtida através da filtragem do sinal retificado.

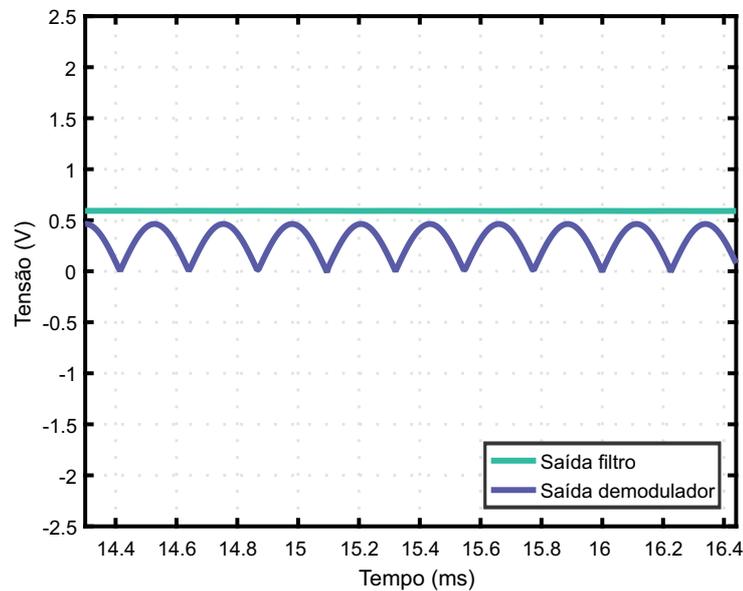


Figura 67: Tensões na saída do filtro e do demodulador. Resultado de simulação

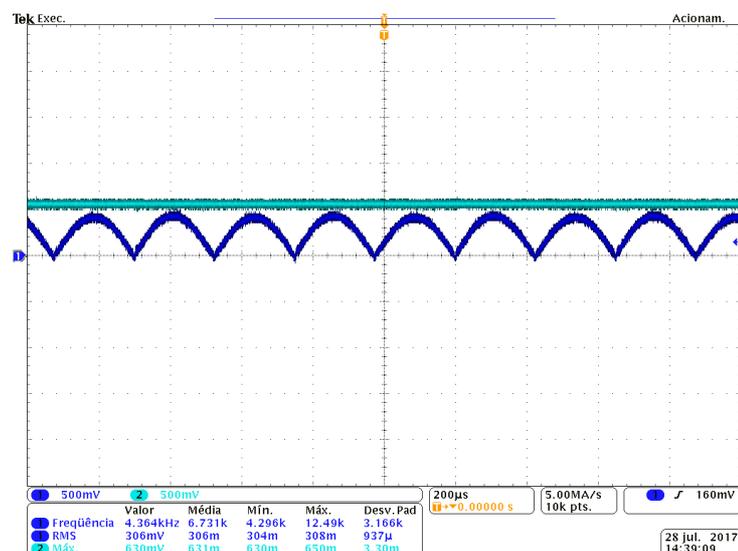


Figura 68: Tensões na saída do filtro e do demodulador. Resultado experimental

4.2.2 Precisão do transdutor e testes variando a temperatura

A figura 69 apresenta os resultados de variação da temperatura.

Verifica-se que, dentro da faixa estudada, a variação de temperatura não causa variações significativas na tensão de saída do transdutor, pois o comportamento do sistema foi o mesmo em todos os casos.

Na sequência são apresentados os resultados de precisão do transdutor.

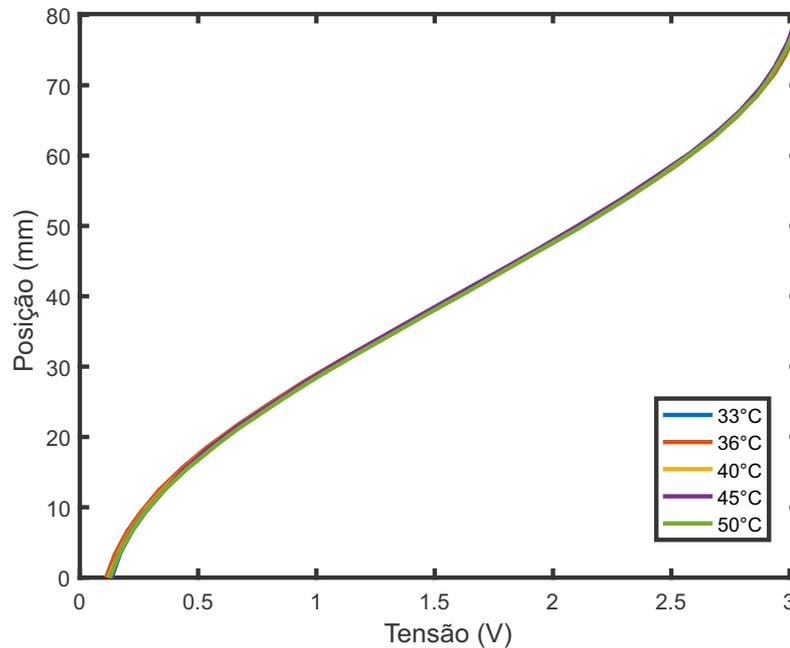


Figura 69: Valores obtidos variando a temperatura no interior da carcaça do LVDT dentro de uma faixa específica

A figura 70 mostra o desvio padrão entre o polinômio médio e os dez polinômios de calibração obtidos no experimento apenas com o transdutor. A forma como os polinômios foram obtidos foi descrito na subseção 3.2.5.

Sabendo o desvio padrão foi possível calcular a margem de erro (M_E), com nível de confiança de 99%. A fórmula para o cálculo de M_E nos casos em que o número de amostras é menor que 30 utiliza a distribuição de Student:

$$M_E = t\sigma_{\bar{X}}. \quad (58)$$

Em que t é o valor obtido na tabela de distribuição de Student e $\sigma_{\bar{X}}$, nos casos em que o número da população não é conhecido, é dado pelo desvio padrão (σ) dividido pelo número de amostras (n_i):

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n_i}}. \quad (59)$$

O intervalo de confiança (I_C) é dado por:

$$I_C = \bar{X} \pm M_E. \quad (60)$$

Sendo \bar{X} a média amostral.

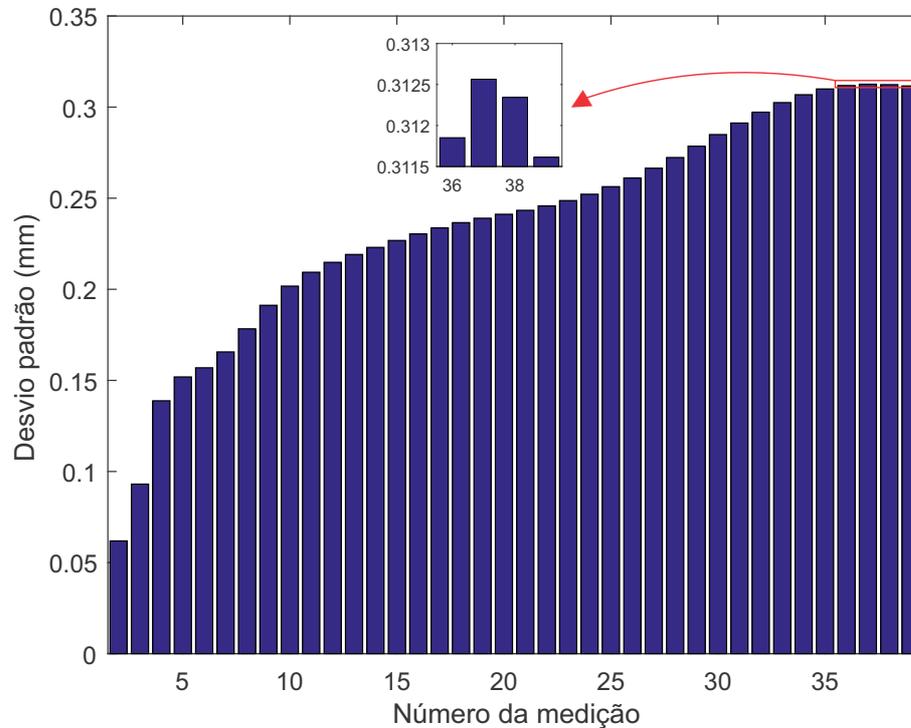


Figura 70: Desvio padrão em relação ao polinômio médio, obtido no experimento apenas com o transdutor

Pela figura [70](#) verificou-se que o desvio padrão máximo, para o experimento só com o LVDT, foi de 0,312 mm. A margem de erro para determinar o erro máximo na leitura de posicionamento do espelho refletor foi calculado neste ponto, pois nos demais trechos o erro é menor.

Sabendo que foram obtidas dez curvas no experimento, e que o nível de confiança desejado era de 99%. Verificou-se, pela tabela, o valor de t para este caso, $t = 3,2498$. O valor gerado pelo polinômio médio no ponto com maior desvio padrão (0,312 mm) foi na posição do núcleo de 42,44 mm, que equivale a medição de número 37. Dessa forma, $I_C = 42,44 \text{ mm} \pm 0,312 \text{ mm}$. Isso significa que, neste ponto, estima-se com 99% de certeza que o erro máximo na leitura da posição do núcleo, em relação ao polinômio médio, é de 0,312 mm, para mais ou para menos. Pode-se afirmar ainda que esse é o erro máximo para todo o trecho do LVDT, pois foi calculado no ponto com maior desvio padrão.

4.3 RELAÇÃO ENTRE O ERRO DE MEDIÇÃO DO SENSOR E O ERRO DE INCLINAÇÃO DO ESPELHO

Como visto na seção 3.3, $\Delta\gamma$ é o erro de inclinação do espelho refletor. Negreiros (2015), chegou a um $\Delta\gamma$ máximo de $0,5^\circ$, obtido em momentos em que o ângulo do espelho era superior a 20° . De fato, quando o acoplamento do sensor é feito diretamente ao espelho, quanto maior o ângulo de inclinação do espelho, maior o erro associado à leitura do LVDT. Porém, quando se utiliza a polia para o acoplamento, o erro associado é sempre o mesmo, independente do ângulo do espelho.

Na sequência foi analisada a relação entre Δf e $\Delta\gamma$. Diferentes valores de Δf foram simulados para verificar o erro gerado na inclinação do espelho. A primeira simulação considerou $\Delta f = 0,5 \mu\text{m}$, menor valor citado na literatura do comprimento em que é possível fazer medições com o LVDT. Outros valores foram realizados, encerrando com $500 \mu\text{m}$, valor 1000 vezes maior que o primeiro. Este valor foi escolhido para comprovar a eficiência do sensor proposto. Pois, mesmo que todo o seu potencial não consiga ser atingido ainda é possível utilizá-lo para realizar medições com alta precisão. Os resultados são mostrados na figura 71. Em todos os casos foi atingida precisão maior que a descrita por Negreiros (2015), que é da ordem de $0,5^\circ$.

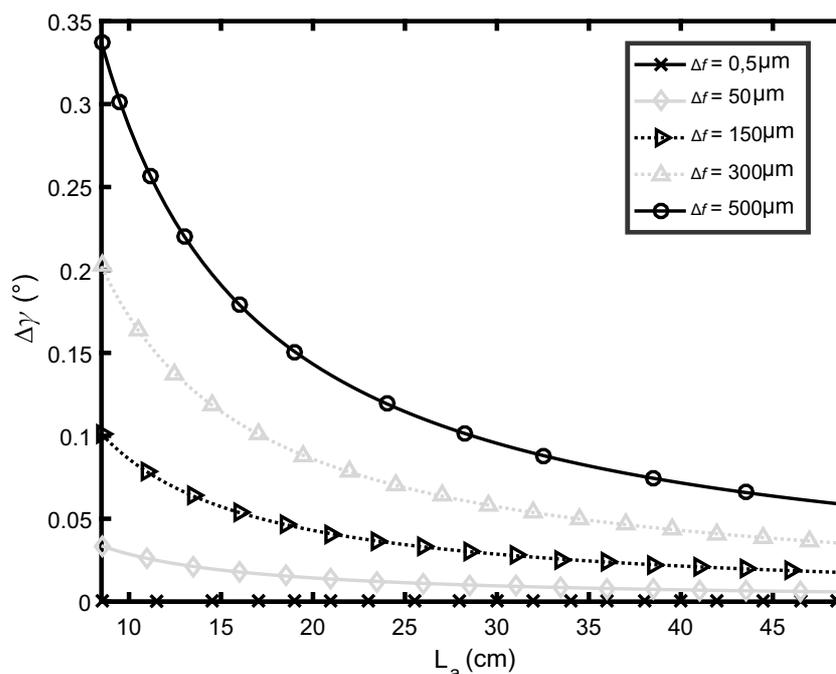


Figura 71: Relação do erro de inclinação ($\Delta\gamma$) com a distância entre sensor e haste do espelho (L_a) para diferentes valores de Δf , para $\gamma = 45^\circ$.

Através da figura dada verifica-se que se o sensor tiver $\Delta f = 0,5 \mu\text{m}$ o erro de inclinação será 0, para qualquer distância de acoplamento L_a . Aumentando Δf para $50 \mu\text{m}$ o erro é inferior a $0,05^\circ$ para qualquer valor de L_a . Quando $\Delta f = 150 \mu\text{m}$ o maior valor de $\Delta\gamma$ é de $0,10^\circ$. Para $\Delta f = 300 \mu\text{m}$, o valor de $\Delta\gamma$ é de no máximo $0,20^\circ$ e para $\Delta f = 500 \mu\text{m}$ o valor de $\Delta\gamma$ é de no máximo $0,33^\circ$.

Verifica-se ainda que, quanto mais longe do centro do espelho o sensor for acoplado, menores são os erros de inclinação associados para um mesmo valor de Δf . Porém, uma maior distância de acoplamento exige um comprimento maior do sensor. Quando o sensor é acoplado a distância de $8,5 \text{ cm}$, é necessário um sensor com deslocamento de $4,15 \text{ cm}$, para realizar as medições de 0 a 28° .

O transdutor construído apresentou precisão de $0,31 \text{ mm}$, a curva $L_a \times \Delta\gamma$ para este caso é mostrada na figura 72.

De acordo com a curva, para uma polia com raio de $8,5 \text{ cm}$ e sensor com precisão de $0,31 \text{ mm}$, o erro gerado na posição angular do espelho será de aproximadamente $0,21^\circ$. Este teste foi feito também na prática e será mostrado na próxima seção, assim como, os outros resultados referentes ao rastreamento solar.

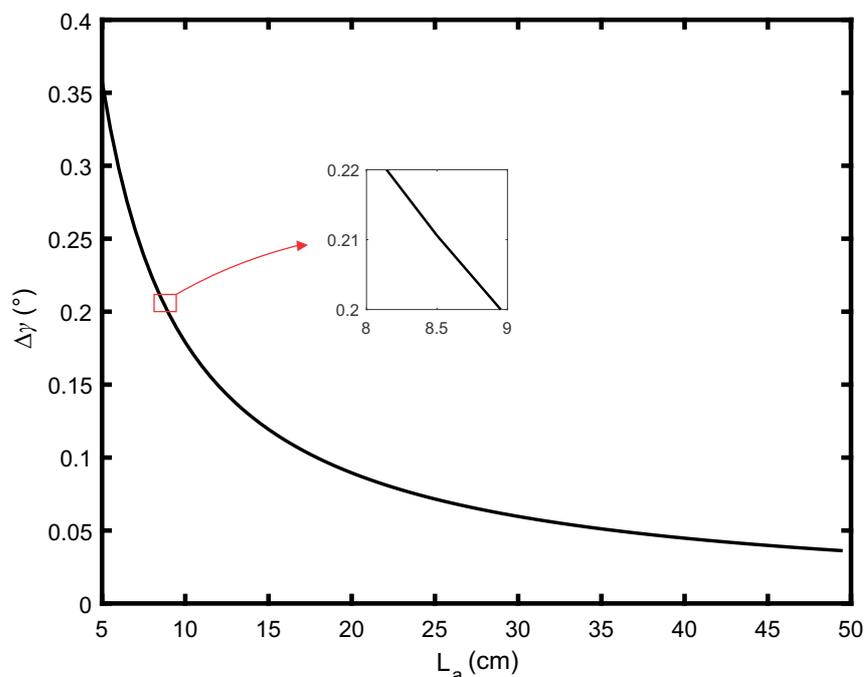


Figura 72: Relação do erro de inclinação ($\Delta\gamma$) com a distância entre sensor e haste do espelho (L_a) para o valor de Δf do sensor construído, para $\gamma = 45^\circ$.

4.4 RASTREAMENTO SOLAR

O gráfico da variação do ângulo entre um eixo paralelo a linha Leste-Oeste e os raios solares (k) durante o dia é mostrado na figura 73 e o ângulo de inclinação do espelho refletor (γ) na 74.

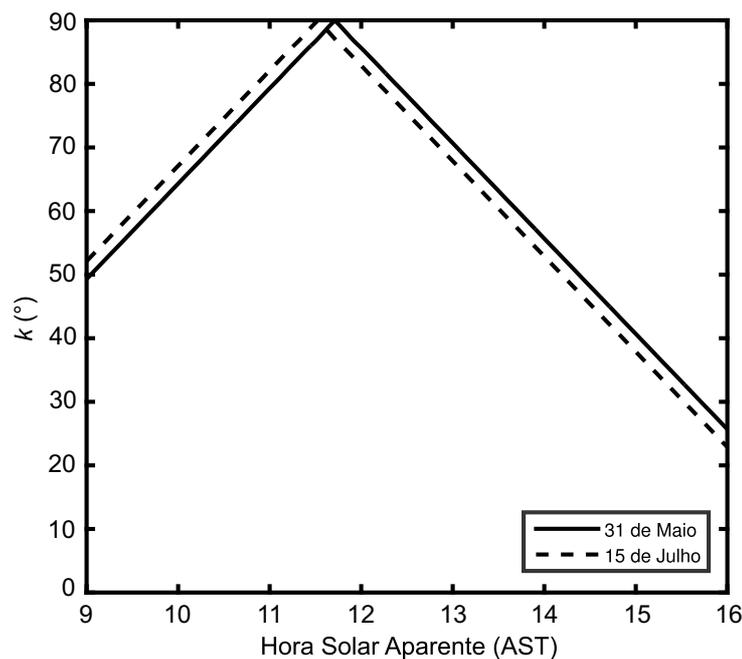


Figura 73: Ângulo k ao longo do dia

O valor de k aumenta linearmente atingindo 90° próximo ao meio-dia solar, posteriormente diminui, também de forma linear, até atingir 20° às 16 horas. Verifica-se que γ varia proporcionalmente a k para possibilitar que o espelho acompanhe o movimento do sol e a radiação incida sobre o receptor.

No início dos testes o ângulo do espelho era de aproximadamente 0° e ao final (16 horas) era de aproximadamente 50° . Notou-se um pequeno incremento em γ para o mês de junho, em relação a maio.

Os resultados referentes a dispersão da radiação mostraram que os espelhos mais distantes sofrem um efeito maior, chegando a 22,33 centímetros para o último espelho. Como pode ser visto na tabela 13. Foi utilizado um receptor de 0,3 metros nas simulações.

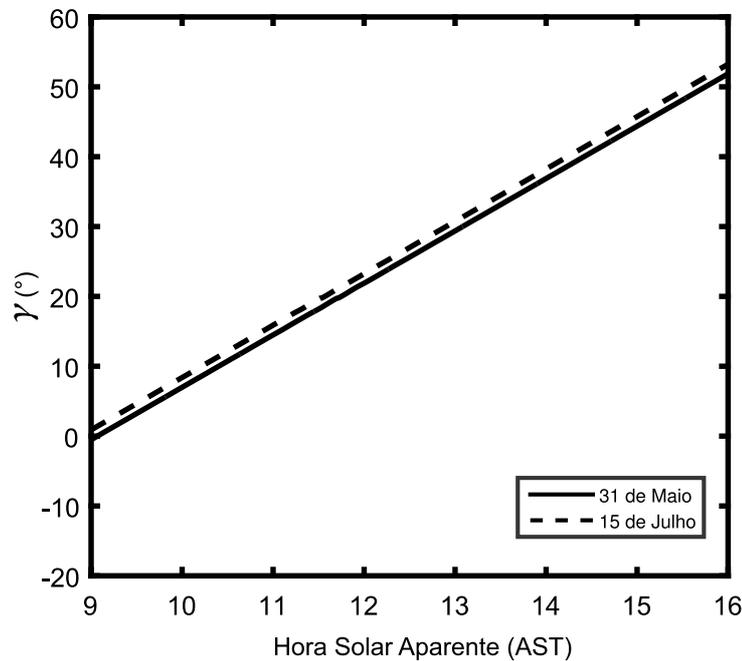


Figura 74: Ângulo de inclinação do espelho para rastreamento no sentido Leste-Oeste

Tabela 13: Largura da radiação refletida sobre o receptor para diferentes distâncias do espelho refletor (m) e receptor instalado a 3,47 m de altura

Distância entre espelho e torre do absorvedor (m)	Largura da radiação refletida (cm)
0,5	20,19
1	20,71
1,5	21,50
2	22,53

4.4.1 Resposta de precisão dos testes com o sistema concentrador

Foi determinado o erro máximo na leitura de posição do espelho refletor. Para isso utilizou-se os mesmos passos da subseção 4.2.2. A diferença é que os resultados anteriores foram obtidos apenas com o transdutor, verificando o erro na leitura da posição do núcleo. Nesta subseção são apresentados os resultados do LVDT acoplado ao espelho refletor.

A figura 75 mostra o desvio padrão obtido para o experimento em que obteve-se os dez polinômios de calibração no intervalo de 0° a 28°. Os desvios mais significativos ocorrem nas extremidades, chegando a 0,268°, devido a característica não-linear do LVDT nessa região.

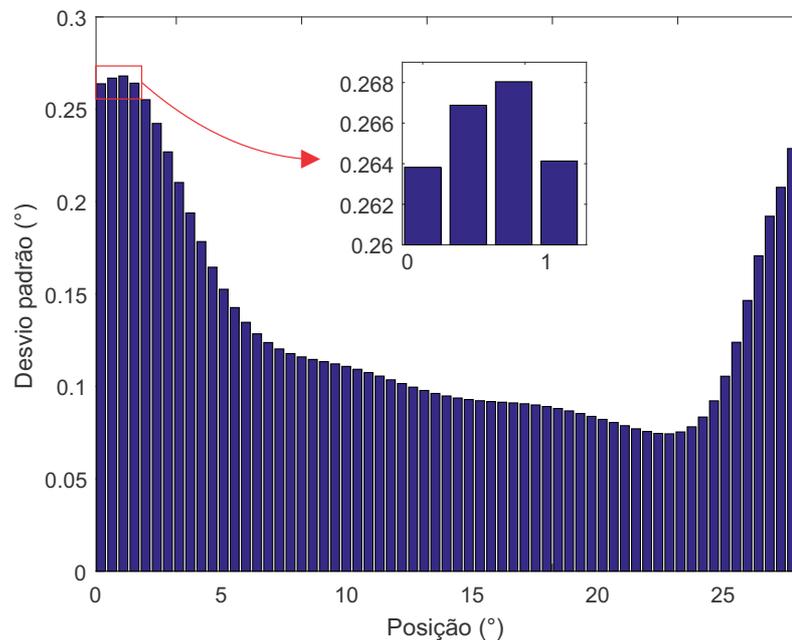


Figura 75: Desvio padrão em relação ao polinômio médio, obtido no experimento com o transdutor acoplado ao espelho refletor

Com base no desvio padrão máximo foi possível determinar que a margem de erro, M_E , para um nível de confiança de 99% é $0,27^\circ$. Dessa forma, $I_C = 0,9763^\circ \pm 0,27^\circ$. Isso significa que, neste ponto, estima-se com 99% de certeza, que a leitura da posição angular do espelho é realizada com erro máximo de $0,27^\circ$, para mais ou para menos, em relação ao valor dado pelo polinômio médio.

4.4.2 Influência dos fatores altura do receptor e distância de instalação do espelho refletor na perda de radiação

A Figura 76 mostra a porcentagem de radiação perdida para cada um dos quatro espelhos planos considerando a precisão de 0,31 mm do LVDT. As variáveis d_{1a} , d_{1b} , d_{1c} e d_{1d} , representam as diferentes distâncias, d_1 , de instalação do espelho refletor. A simulação mostra os resultados para diferentes alturas de instalação do tubo receptor. Verifica-se que a altura em que o sistema apresentou a maior eficiência foi 3,47 metros. Para este caso os três espelhos mais próximos não apresentam perdas de radiação e o espelho mais distante apresenta 3,08%.

A Tabela 14 mostra os resultados obtidos nos testes de simulação para verificação do Δd (desvio, em centímetros, da concentração dos raios solares na superfície receptora devido a $\Delta\gamma$) para diferentes valores de $\Delta\gamma$. Esses testes são para

um receptor instalado a 3,47 m de altura.

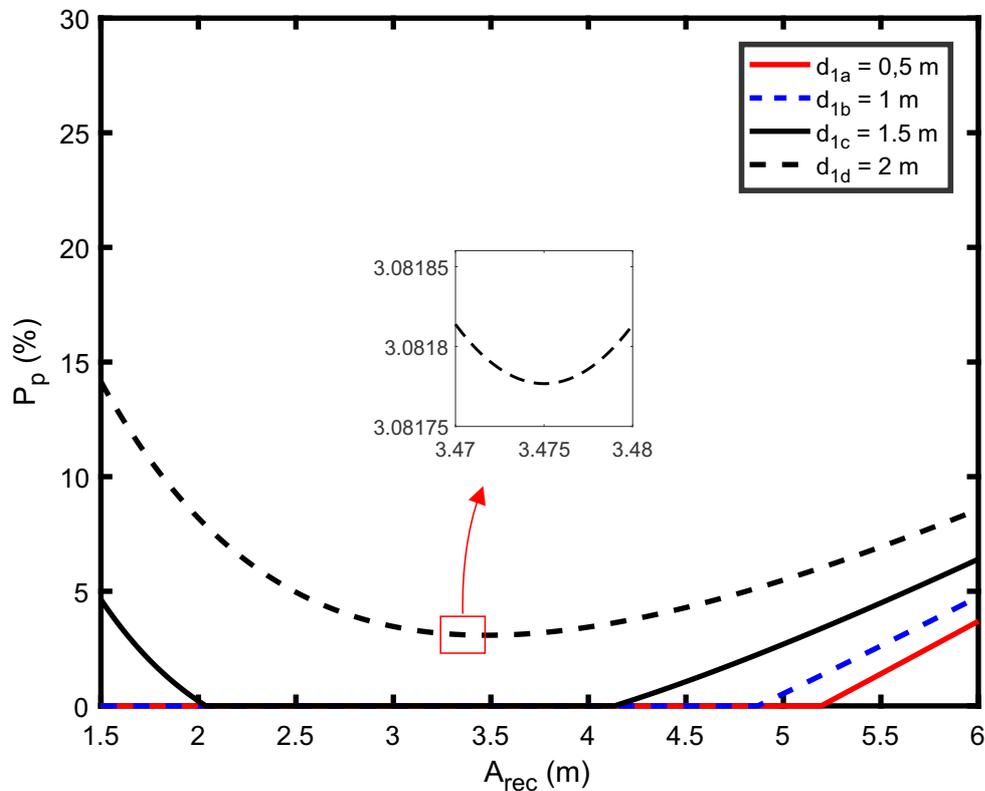


Figura 76: Perda de radiação do sistema para diferentes alturas de instalação do receptor

Tabela 14: Valor de Δd para diferentes erros de inclinação do espelho (m) para um receptor instalado a 3,47 m de altura

Distância entre Espelho e Torre do absorvedor (d_1) (m)	Erro de inclinação do Espelho ($\Delta\gamma$)				
	0,2°(cm)	0,27°(cm)	0,3°(cm)	0,4°(cm)	0,5°(cm)
0,5	2,47	3,34	3,71	4,95	6,20
1,0	2,63	3,55	3,94	5,27	6,59
1,5	2,88	3,89	4,33	5,78	7,24
2,0	3,24	4,38	4,87	6,50	8,15

Verifica-se que o valor de Δd é pequeno para os espelhos próximos do receptor e aumenta para os espelhos mais distantes, chegando a 8,15 cm no caso extremo, que é quando o erro de inclinação é de 0,5° e o espelho está posicionado a 2 m de distância do receptor. A tabela 15 mostra a porcentagem de radiação solar que deixa de incidir sobre o receptor devido ao deslocamento da radiação.

Para um erro de 0,2° não existe perda de radiação incidente. Quando o erro foi aumentado para 0,27° apenas o espelho mais distante passou a ter perda,

Tabela 15: Perda de radiação solar incidente (P_P) devido a $\Delta\gamma$ para um receptor instalado a 3,47 m de altura

Distância entre Espelho e Torre do absorvedor (d_1) (m)	Erro de inclinação do Espelho ($\Delta\gamma$)				
	0,2°(%)	0,27°(%)	0,3°(%)	0,4°(%)	0,5°(%)
0,5	0	0	0	0,36	6,52
1,0	0	0	0	3,18	9,59
1,5	0	0	0,58	7,36	14,15
2,0	0	3,08	5,26	12,56	19,85

da ordem de 3,08%. Aumentando o erro para 0,3°, os dois espelhos mais distantes passaram a ter perdas, de 0,58% e 5,26%. Aumentando ainda mais o erro, dessa vez para 0,4°, verifica-se perda para todos os espelhos, chegando a 12,56% para o mais distante. Quando o erro é de 0,5° a perda de energia chega a 19,86% no espelho mais distante.

A Figura 77 ilustra as perdas descritas na Tabela 15, para o caso em que o erro de inclinação é de 0,5°.

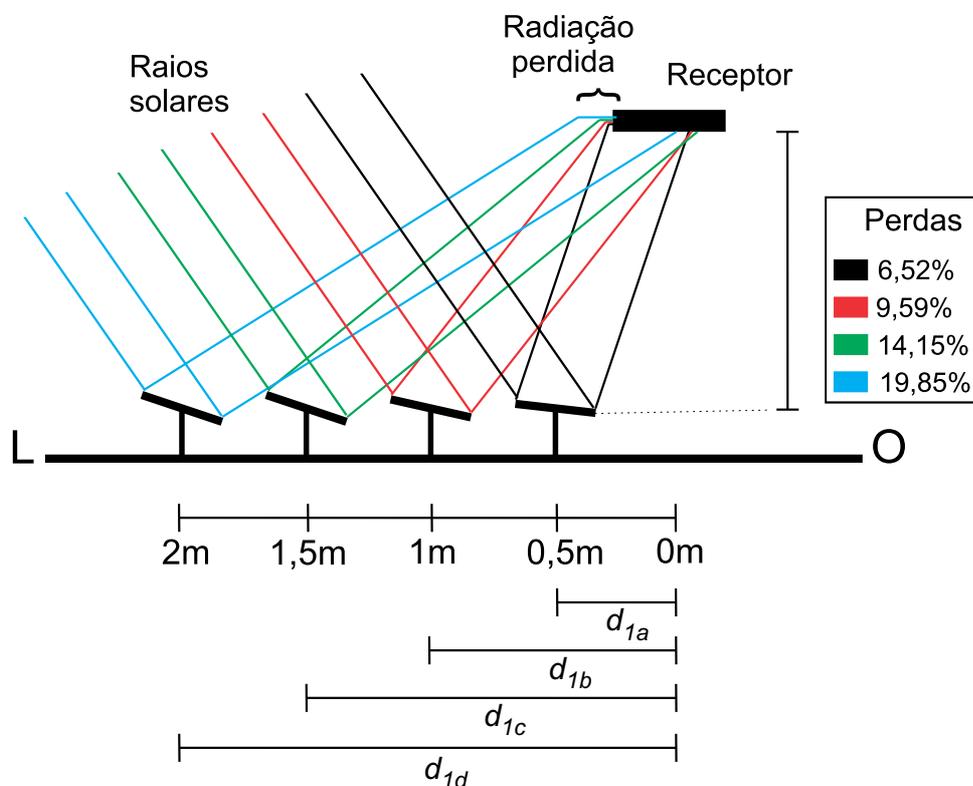


Figura 77: Radiação solar perdida para um erro de inclinação dos espelhos de 0,5°

Após a análise destas informações, serão mostrados na sequência os de-

talhes do controle de rastreamento do concentrador.

4.5 CONTROLE DE RASTREAMENTO

A figura 78 apresenta o resultado do teste experimental de rastreamento completo (utilizando todo o percurso do LVDT), iniciando em 45° e indo a 0° .

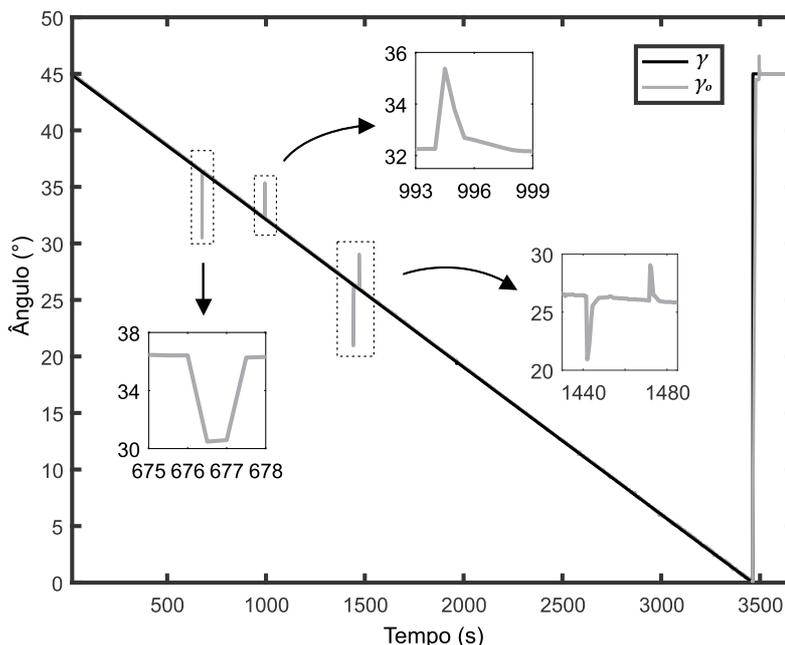


Figura 78: Ângulo do espelho durante o processo de rastreamento.

Para obter maior velocidade na obtenção dos resultados acelerou-se o movimento do espelho, fazendo o rastreamento completo em 1 hora. Foram inseridas perturbações, aplicação de força para provocar deslocamento angular por um determinado período, repetindo-se em três momentos diferentes. As duas primeiras vezes ocorreram em um período curto de tempo (1 segundo) e atuaram em lados opostos do espelho, forçando a compensação do espelho a ocorrer em sentidos opostos. A terceira perturbação teve um período de atuação mais longo (10 segundos) e ao cessá-la o rastreador ultrapassou a posição ótima e corrigiu-se na sequência. Para este último caso, mesmo ainda sobre efeito da perturbação, a posição do espelho foi compensada. Em todas as perturbações o controle fez o espelho voltar à posição ótima. Quando o processo de rastreamento terminou, o espelho foi movido para a sua posição inicial, levando aproximadamente 40 segundos, após o comando ser realizado, para atingir os 45° , representando o posicionamento do espelho para o próximo dia.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A estrutura mecânica construída é robusta, com ângulos bem projetados, possibilitando um deslocamento adequado do espelho refletor.

Verificou-se através das simulações realizadas, que a variação da inclinação do ângulo do espelho refletor se manteve entre 0° e 51° , para os horários dentro da faixa de 09:00 às 16:00. Dessa forma o rastreamento solar foi projetado para trabalhar dentro dessas condições.

Para o teste de controle de posição do espelho refletor utilizou-se a faixa completa do sensor, que corresponde ao deslocamento de 0° a 45° , porém, verificou-se que acima de 28° a não linearidade do LVDT compromete a leitura de posição de forma precisa. Assim, o rastreamento teve que ser limitado de 0° a 28° . Para trabalhar na faixa de 0° a 45° um outro sensor, com dimensões maiores, deve ser construído.

Para a escolha da altura de instalação do receptor, as simulações realizadas indicam que 3,47 metros seria a altura ideal para um sistema com erro de inclinação máximo de $0,27^\circ$, constituído por oito espelhos, colocados entre 0,5 e 2 metros do receptor, em intervalos de 0,5 m, quatro de cada lado.

Com relação ao erro de precisão do sistema, erros de $0,2^\circ$ reduzem a perda a zero para todos os espelhos. Um erro de $0,27^\circ$ reduz o erro a zero para os três espelhos mais próximos, apenas o espelho mais distante apresenta perda, da ordem de 3,08%.

Quando submetido a perturbações o controle fez o espelho voltar para a posição de referência rapidamente, mostrando que a solução proposta funcionou de forma eficaz.

O transdutor apresentou boa resposta à variação de temperatura, não apresentando variações significativas na tensão de saída.

Verificou-se que para um mesmo valor de Δf , quanto mais longe o sensor for acoplado da haste do espelho, menor será o valor de $\Delta \gamma$ associado a medição.

Pelo fato do LVDT construído ter precisão de 0,31 mm, pode ser acoplado a distâncias pequenas.

Os resultados deste trabalho possibilitaram o aceite de 4 artigos completos em diferentes congressos.

- "Aplicação de transformadores diferenciais lineares variáveis em seguidor solar para refletor linear fresnel", IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (2016).
- "Avaliação de estratégia para obtenção das características elétricas de um transformador diferencial linear variável através de simulação e experimento", Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (2016).
- "Correlação entre desvios angulares de seguidores solares e eficiência de conversão de energia em concentrador solar do tipo refletor linear de fresnel", XXI Congresso Brasileiro de Automática (2016).
- "Development and Evaluation of a Linear Variable Differential Sensor", 2° International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (2017).

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como complemento ao trabalho desenvolvido, sugere-se para trabalhos futuros:

- Construir um sistema com vários espelhos e realizar experimentos concentrando a radiação solar em um receptor.
- Comparar resultados obtidos apenas com motor de passo e com o sensor acoplado ao espelho.
- Substituir o sensor utilizado por outros (RVDT, por exemplo) e comparar aos resultados obtidos com o LVDT.
- Realizar experimentos com espelhos planos e curvos e comparar os resultados obtidos.
- Verificar na prática a influência da altura de instalação do receptor na eficiência do sistema.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, R.; MUÑOZ-ANTÓN, J.; VALDÉS, M.; MARTÍNEZ-VAL, J.M. High concentration linear Fresnel reflectors. **Energy Conversion and Management**, v. 72, p. 60–68, 2013.
- ABOUZEID, M. 2 - Use of a reluctance stepper motor for solar tracking based on a programmable logic array (PLA) controller. **Renewable Energy**, v. 23, n. 3-4, p. 551–560, 2001.
- ADARME-MEJÍA, L. M.; IRIZARRY-RIVERA, A. A. Feasibility study of a linear fresnel concentrating solar power plant located in ponce, puerto rico. In: **2015 North American Power Symposium (NAPS)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- AKKAYA, R.; KULAKSIZ, a. a. A microcontroller-based stand-alone photovoltaic power system for residential appliances. **Applied Energy**, v. 78, n. 4, p. 419–431, 2004.
- ALERTA, Control Y; UN, E N; FRESNEL, Concentrador Tipo. Sistemas informaticos para el diseño, control y alerta en un sistema concentrador tipo fresnel. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 14, p. 107–111, 2010.
- ALMEIDA, G. S. M. **Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema termoeletrico do tipo Linear Fresnel Reflector**. 86 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.
- ALTAS, I. H.; SHARAF, a. M. A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems. **Renewable Energy**, v. 33, n. 3, p. 388–399, 2008.
- ALVES, L. P. **Automação de dados de medidores de deslocamento e aceleração**. 2007. Monografia (Bacharel em Engenharia de Controle e Automação), UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto), Ouro Preto, Brasil.
- Amir ABAS, M.; Hilmi Fadzil S, M.; KADIR, Samsudin a.; Khusairy Azim, a. Improved structure of solar tracker with microcontroller based control. **Proceedings - 2010 2nd International Conference on Advances in Computing, Control and Telecommunication Technologies, ACT 2010**, p. 55–59, 2010.
- ANALOG DEVICES. **Universal LVDT signal conditioner**. 1995. Disponível em: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD698.pdf>.
- ANDÒ, Bruno; ASCIA, Alberto; BAGLIO, Salvatore; SAVALLI, Nicolò. A novel ferrofluidic inclinometer. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 56, n. 4, p. 1114–1123, 2007.
- ARENY, R. P. **Sensores y acondicionadores de señal**. 4. ed. Catalunha: Marcombo Boixareu Editores, 2004. 494 p.

- ATHAYDE, J. N. **Dispositivo oscilatório para avaliação tribológica em biomateriais, utilizando tribômetro linear**. 237 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2015.
- BAI, Y.; FRAISSE, G.; WURTZ, F.; FOGGIA, A.; DELESS, Y.; DOMAIN, F. 10 - Experimental and numerical study of a directly PV-assisted domestic hot water system. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 85, n. 9, p. 1979–1991, 2011.
- BAJPAL, Prabodh; KUMAR, Subhash. Design, development and performance test of an automatic two-axis solar tracker system. **Proceedings - 2011 Annual IEEE India Conference: Engineering Sustainable Solutions, INDICON-2011**, 2011.
- BANDEIRA, F. de P. M. O aproveitamento da energia solar no brasil - situação e perspectivas. **Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Brasília**, 2012.
- BANERJEE, Kumardeb; DAM, Bivas; MAJUMDAR, Kalyan. A novel FPGA-based LVDT signal conditioner. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, 2013.
- BARBÓN, A.; BARBÓN, N.; BAYÓN, L.; OTERO, J.A. Theoretical elements for the design of a small scale linear fresnel reflector: Frontal and lateral views. **Solar Energy**, v. 132, p. 188 – 202, 2016. ISSN 0038-092X.
- BARBOSA, E. S. **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreamento de concentradores cilíndrico-parabólicos**. 91 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2009.
- BARLEV, David; VIDU, Ruxandra; STROEVE, Pieter. Innovation in concentrated solar power. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 95, n. 10, p. 2703 – 2725, 2011.
- BENTAHER, H.; KAICH, H.; AYADI, N.; Ben Hmouda, M.; MAALEJ, A.; LEMMER, U. A simple tracking system to monitor solar PV panels. **Energy Conversion and Management**, Elsevier Ltd, v. 78, p. 872–875, 2014.
- BENYAKHLEF, S.; Al Mers, a.; MERROUN, O.; BOUATEM, a.; BOUTAMMACHTE, N.; El Alj, S.; AJDAD, H.; ERREGUERAGUI, Z.; ZEMMOURI, E. Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators. **Renewable Energy**, Elsevier Ltd, v. 89, p. 463–474, 2016.
- CANAVARRO, D. C. S. **Modelização de campos de colectores solares lineares do tipo Fresnel; aplicação a um concentrador inovador do tipo CLFR**. 79 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.
- CARDOZO, W. S. **Controle de motores de passo em malha fechada aplicado a um manipulador robótico**. 140 p. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.
- CHOUZAL, M. F. C. **Controle digital de motores passo-a-passo**. 132 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Do Porto, Porto, Portugal, 1991.

- CIFUENTES, Á. J. C. **Evaluación de un concentrador solar lineal tipo fresnel de baja entalía como calor de proceso**. 117 p. Dissertação (Mestrado) — Universidad Veracruzana, Xalapa Enríquez, México, 2013.
- COSTA JUNIOR, A. G. **Medição de deslocamento utilizando um Transformador Diferencial Variável Linear baseada em técnicas de estimação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Campina Grande, 2005.
- CRUZ, J. A. M. **Diseño de un concentrador solar lineal tipo fresnel de baja entalpía para calor de procesos**. 142 p. Dissertação (Mestrado) — Universidad Veracruzana, Xalapa Enríquez, México, 2012.
- DAI, J.; ZHENG, H.; SU, Y.; CHANG, Z. The motional design and analysis for linear fresnel reflector system combined three-movement. **Energy Procedia**, v. 14, p. 971 – 976, 2012.
- DGS. **Planning and installing solar termal systems: a guide for installers, architects, and engineers. Deutsche Gesellschaft für Sinnenenergie (German Solar Energy Society)**. 2. ed. UK and USA: James & James Ltd, 2005. 369 p.
- DIAS, R. P. F. **Transformador Diferencial de Variação Linear - Condicionamento de sinal e desmodulação síncrona**. 102 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2015.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1991.
- ECHAZÚ, R.; SARAVIA, L.; PLACCO, C. Caldera solar compacta con Concentrador Fresnel: Diseño y construcción. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 1, p. 03.69–03.73, 2013.
- ELMAANAOU, Y.; SAIFAOU, D. Shading efficiency calculation for linear fresnel reflector. In: **2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IR-SEC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 100–103.
- ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Primeira planta HLT em clima frio entra em operação no Canadá**. 2015. Disponível em: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/noticias>.
- FAN, Jinhui; JIA, Songmin; LU, Wei; WANG, Zhihong; LI, Xiuzhi; SHENG, Jinbo. Application of LVDT sensor data acquisition system based on PCI-1716. **Proceedings - 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, CSAE 2011**, v. 3, p. 548–552, 2011.
- FÉLIX, M.; LIZÁRRAGA, a.; ISLAS, a.; GONZÁLEZ, a. Analysis of a ferrofluid core LVDT displacement sensor. **IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)**, p. 1769–1772, 2010.
- FERNÁNDEZ-GARCÍA, Aránzazu; CANTOS-SOTO, M. Elena; RÖGER, Marc; WIECKERT, Christian; HUTTER, Christian; MARTÍNEZ-ARCOS, Lucía. Durability of solar reflector materials for secondary concentrators used in CSP systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 130, p. 51–63, 2014.

- FERRETTI, Gianni; GRUOSSO, Giambattista; MAGNANI, Gianantonio; REDAELLI, Manuele; ROCCO, Paolo; GUARDABASSI, Guido. Mechatronic design of the sun tracking system of a linear fresnel reflector solar plant. **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)**, v. 0, p. 248–254, 2010.
- FORD, G. Csp: bright future for linear fresnel technology? **Renewable Energy Focus**, v. 9, n. 5, p. 48 – 51, 2008.
- FOWLER, Kim R.; SCHMALZEL, John L. Sensors: The first stage in the measurement chain. **IEEE Instrumentation and Measurement Magazine**, v. 7, n. 3, p. 60–66, 2004.
- FRENZEL JUNIOR, L. E. **Fundamentos de comunicação eletrônica**. 3. ed. New York: AMGH Editora Ltda, 2013. 238 p.
- GEA, M.; SARAVIA, L.; FERNÁNDEZ, C.; CASO, R. Concentrador lineal fresnel para la generación directa de vapor de agua #. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 11, p. 03.83–03.89, 2007.
- GEA, M.; SARAVIA, L.; PLACCO, C.; ALTAMIRANO, M.; HONGN, M.; CASO, R.; TILCA, F.; SULIGOY, H. Diseño y estado de avance de la construcción de un concentrador fresnel lineal de $270m^2$. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 16, p. 79–86, 2012.
- GHARBI, N. E.; DERBAL, H.; BOUAICHAOU, S.; SAID, N. A comparative study between parabolic trough collector and linear fresnel reflector technologies. **Energy Procedia**, v. 6, p. 565 – 572, 2011.
- GHONEIM, a. a. 43 - Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 11-12, p. 1449–1463, 2006.
- GOELLNER, E. **Ferramenta computacional para acionamento de motores de passo aplicados ao projeto de equipamentos CNC**. 100 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2006.
- GRENA, Roberto. An algorithm for the computation of the solar position. **Solar Energy**, v. 82, n. 5, p. 462–470, 2008.
- GRENA, Roberto; TARQUINI, Pietro. Solar linear fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid. **Energy**, v. 36, n. 2, p. 1048 – 1056, 2011.
- GUERREIRO, L.; CANAVARRO, D.; Collares Pereira, M. Efficiency Improvement and Potential LCOE Reduction with an LFR-XX SMS Plant with Storage. **Energy Procedia**, Elsevier B.V., v. 69, p. 868–878, 2015.
- GUPTA, M.K.; KAUSHIK, S.C.; RANJAN, K.R.; PANWAR, N.L.; REDDY, V. Siva; TYAGI, S.K. Thermodynamic performance evaluation of solar and other thermal power generation systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 50, p. 567–582, 2015.

HABERLE, A.; ZAHLER, C.; LERCHENMULLER, H.; MERTINS, M.; WITTEWER, C.; TRIEB, F.; DERSCH, J. The solarmundo line focussing fresnel collector. optical and thermal performance and cost calculations. **International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies**, 2002.

HEIMSATH, A.; CUEVAS, F.; HOFER, A.; NITZ, P.; PLATZER, W.J. Linear fresnel collector receiver: Heat loss and temperatures. **Energy Procedia**, v. 49, p. 386 – 397, 2014. Proceedings of the SolarPACES 2013 International Conference.

HIGASHI, E. M. **Modelagem da bobina de Rogowski para medidas de pulsos de corrente elétrica**. 82 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2006.

HIPER METAL. **Polipropileno**. Março 2016a. Disponível em: http://www.hipermetal.com.br/site/produtos/plasticos_industriais/POLIPROPILENO.pdf.

HIPER METAL. **Nylon**. Março 2016b. Disponível em: http://www.hipermetal.com.br/site/produtos/plasticos_industriais/NYLON.pdf.

HOYOS, D.; GEA, M.; CADENA, D.; ECHAZÚ, R. Diseño y construcción de seguidores solares. analisis y comparación. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 12, p. 71–77, 2008.

HOYOS, D.; MOYA, T.; ECHAZÚ, R.; HERNÁNDEZ, A. Sistema de control para el seguidor solar de un concentrador tipo fresnel. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 13, n. 0329-5184, p. 08.161–08.167, 2009.

HUANG, B.J.; DING, W.L.; HUANG, Y.C. Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 85, n. 9, p. 1935–1944, 2011.

HUANG, B. J.; HUANG, Y. C.; CHEN, G. Y.; HSU, P. C.; LI, K. 54 - Improving solar PV system efficiency using one-axis 3-position sun tracking. **Energy Procedia**, Elsevier B.V., v. 33, p. 280–287, 2013.

JUTTY, M. K.; SWAMINATHAN, V.; KAZIMIERCZUK, M. K. Frequency characteristics of ferrite core inductors. In: **Proceedings of Electrical/Electronics Insulation Conference**. [S.l.: s.n.], 1993. p. 369–372. ISSN 1071-6270.

KALOGIROU, Soteris. The potential of solar industrial process heat applications. **Applied Energy**, v. 76, n. 4, p. 337–361, 2003.

KALOGIROU, S. **Solar energy engineering: processes and systems**. 1. ed. San Diego: Elsevier Academic Press UK, 2009. 756 p.

KALOGIROU, Soteris a. Design and construction of a one-axis sun-tracking system. **Solar Energy**, v. 57, n. 6, p. 465–469, 1996.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, p. 231 – 295, 2004.

KEITH, A.; ASTAKHOV, V. P.; BANDYOPADHYAY, A.; BHATIA, V.; CLAUS, R. O.; DAYTON, D.; EREN, H.; HYATT JUNIOR, R. M.; JANAS, V. F.; KARLSSON, N.; KHOLKINE, A.; KO, J.; KONG, W. L.; KU, S.; MAYER, J. R. R.; NYCE, D. S.; PEDERSEN, T. O.; SAFARI, A.; WANG, A.; WETSEL, G. C.; ZAGAR, B. G. **Displacement Measurement, Linear and Angular**. 1. ed. [S.l.]: CRC Press LLC, 1999. 166 p.

KESTER, W. **Practical design techniques for sensor signal conditioning**. [S.l.]: Analog devices, 1999.

KHADIDJA, Bouziane; DRIS, Korichi; BOUBEKER, Azoui; NOUREDDINE, Settou. Optimisation of a Solar Tracker System for Photovoltaic Power Plants in Saharian Region, Example of Ouargla. **Energy Procedia**, Elsevier B.V., v. 50, p. 610–618, 2014.

KRELLING, P. C. L. **Concepção de um inclinômetro foto-mecânico para controle geodésico de estruturas**. 207 p. Tese (Doutorado) — Unifersidade Federal do Paraná, 2006.

LANCEREAU, Q.; RABUT, Q.; ITSKHOKINE, D.; BENMARRAZE, M. Wind loads on linear fresnel reflectors technology: A numerical study. **Energy Procedia**, v. 69, p. 116 – 125, 2015. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014.

LIN, M.; SUMATHY, K.; DAI, Y.J.; WANG, R.Z.; CHEN, Y. Experimental and theoretical analysis on a linear fresnel reflector solar collector prototype with v-shaped cavity receiver. **Applied Thermal Engineering**, v. 51, p. 963 – 972, 2013.

LOVE, Lonnie J.; JANSEN, John F.; MCKNIGHT, Tim E.; ROH, Yul; PHELPS, Tommy J.; YEARY, Lucas W.; CUNNINGHAM, Glen T. Ferrofluid field induced flow for microfluidic applications. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 10, n. 1, p. 68–76, 2005.

MANDAL, N; KUMAR, Brajesh; RAJITA, G. A Modified Design of a Flow Transmitter Using Rotameter as a Primary Sensor and LVDT as a Transducer. p. 194–198, 2014.

MARTINO, M.; DANISI, A.; LOSITO, R.; MASI, A.; SPIEZIA, G. Design of a linear variable differential transformer with high rejection to external interfering magnetic field. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 46, n. 2, p. 674–677, Feb 2010.

MARTINO, M.; DANISI, a.; LOSITO, R.; MASI, a.; SPIEZIA, G. Design of a linear variable differential transformer with high rejection to external interfering magnetic field. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 46, n. 2, p. 674–677, 2010.

MASI, A.; BRIELMANN, A.; LOSITO, R.; MARTINO, M. LvdT conditioning on the lhc collimators. In: **2007 15th IEEE-NPSS Real-Time Conference**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–8.

MASI, A.; BRIELMANN, A.; LOSITO, R.; MARTINO, M. LvdT conditioning on the lhc collimators. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 55, n. 1, p. 67–75, Feb 2008.

- MASI, Alessandro; DANISI, Alessandro; LOSITO, Roberto; MARTINO, Michele; SPIEZIA, Giovanni. Study of magnetic interference on a LVDT prototype. **2010 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC 2010 - Proceedings**, p. 219–223, 2010.
- MICHALSKY, Joseph J. The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950-2050). **Solar Energy**, v. 40, n. 3, p. 227–235, 1988.
- MILLS, David R.; MORRISON, Graham L. Compact linear fresnel reflector solar thermal powerplants. **Solar Energy**, v. 68, n. 3, p. 263 – 283, 2000.
- MIRANDA, Marco António Cunha. **Optimização de sistemas solares térmicos**. 150 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.
- MISRA, P.; MOHINI, S. K.; MISHRA, S. K. The design and implementation of an ann-based non-linearity compensator of lvdt sensor. **arXiv preprint arXiv:1407.0506**, 2014.
- MONTES, María J.; RUBBIA, Carlo; ABBAS, Rubén; MARTÍNEZ-VAL, José M. A comparative analysis of configurations of linear fresnel collectors for concentrating solar power. **Energy**, v. 73, p. 192 – 203, 2014.
- MORIN, G.; DERSCH, J.; PLATZER, Werner; ECK, Markus; HÄBERLE, Andreas. Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants. **Solar Energy**, v. 86, n. 1, p. 1–12, 2012.
- MOTTA, E. C. **CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTORES INDUTIVOS DE DESLOCAMENTO**. 126 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande Do Sul, 2002.
- MUSSOI, F. L. R. **Fundamentos de eletromagnetismo**. [S.l.], 2005.
- NEGREIROS, I. S. **Desenvolvimento do sistema de rastreamento de um protótipo de Concentrador Solar Fresnel Linear**. 116 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2015.
- NEUBERT, H. K. P. **Instrument Transducers. An Introduction to Their Performance and Design**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1975. 390 p.
- NOVACEK, G. **Accurate linear measurement using LVDTs**. maio 1999. Disponível em: <http://chipcenter.com/images/ccellar/e058pdf1.pdf>.
- NYCE, D. S. **Linear position sensors**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2004. 170 p.
- PEDROSA FILHO, M. H. De O. **Simulação e análise de sistemas de alta concentração de radiação solar**. 122 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2010.
- PENAFIEL, R. A. S. **Cenários de geração de eletricidade a partir de geradores heliotérmicos no Brasil: A influência do armazenamento de calor e da hibridação**. 202 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

- PHILIPS SEMICONDUCTORS. **Data sheet NE/SA5521: LVDT signal conditioner.** [S.l.], 2002.
- PIGOZZO FILHO, V. C. **Análise experimental de um sistema solar com concentrador cilíndrico parabólico.** 114 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2013.
- PRINSLOO, G.; DOBSON, R. **Solar Tracking: High precision solar position algorithms, programs, software and source-code for computing the solar vector, solar coordinates & sun angles in Microprocessor, PLC, Arduino, PIC and PC-based sun tracking devices or dynamic sun following hardware.** 1. ed. África do Sul: Book Edition, 2009. 756 p.
- PUROHIT, Ishan; PUROHIT, Pallav. Techno-economic evaluation of concentrating solar power generation in india. **Energy Policy**, v. 38, n. 6, p. 3015 – 3029, 2010. ISSN 0301-4215. The Role of Trust in Managing Uncertainties in the Transition to a Sustainable Energy Economy, Special Section with Regular Papers. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510000698>.
- RAJ, M. A.; MEERA, V.; JANANI, P. Comparative study and transient analysis of winding shapes in linear variable differential transformer. **Electrical Energy Systems (ICEES), 2014 IEEE 2nd International Conference on**, p. 132–134, Jan 2014.
- REBOITA, M. S.; ANGELITA, de P. P.; NATIVIDADE, U. A. Influência da inclinação do eixo de rotação da terra na temperatura do ar mundial. **Terrae Didactica**, n. 2, p. 67–77, 2015.
- REDA, Ibrahim; ANDREAS, Afshin. Solar position algorithm for solar radiation applications. **Solar Energy**, v. 76, n. 5, p. 577–589, 2004.
- ROTH, P.; GEORGIEV, a.; BOUDINOV, H. Design and construction of a system for sun-tracking. **Renewable Energy**, v. 29, n. 3, p. 393–402, 2004.
- RUBIO, F. R.; ORTEGA, M. G.; GORDILLO, F.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, M. Application of new control strategy for sun tracking. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 7, p. 2174–2184, 2007.
- SAETTONE, E. Design and construction of a Fresnel linear distiller. **Applied Solar Energy**, v. 50, n. 4, p. 238–243, 2014.
- SALVO, N.; ALTAMIRANO, M.; BÁRCENA; SARAVIA, L. Ensayo de un concentrador fresnel. Calculo de eficiencia. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 13, p. 03.99–03.104, 2009.
- SANTHOSH, K.V.; ROY, B.K. A smart displacement measuring technique using linear variable displacement transducer. **Procedia Technology**, v. 4, p. 854 – 861, 2012. 2nd International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology(C3IT-2012) on February 25 - 26, 2012.
- SANTIAGO, B.; SALVIANO, A. **Astronomia Geodésica: Posicionamento pelas Estrelas.** 1. ed. Porto Alegre: [s.n.], 2005. 160 p.

- SARAVIA, L.; M.GEA; HONGN, M.; HOYOS, D.; BARCENA, H.; PLACCO, C.; CADENA, C.; LARSEN, S. Flores; DELICOMPAGNI, P.; CONDORÍ, M.; MARTÍNEZ, C.; FERNÁNDEZ, C.; CASO, R.; ALTAMIRANO, M.; SULIGOY, H. Descripción de un generador solar térmico de tipo fresnel instalado en San Carlos, Salta. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 18, p. 03.17–03.26, 2014.
- SARKAR, N. K. **Finite Element Modeling of inear Variable Differential Transformer**. 81 p. Dissertação (Mestrado) — Jadavpur University, Kolkata, India, 2013.
- SAXENA, Suresh C.; LAL SEKSENA, S. B. A Self-Compensated Smart LVDT Transducer. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 38, n. 3, p. 748–753, 1989.
- SCHENK, H; FELDHOFF, J. F.; HIRSCH, T; WITTMANN, M. Energetic Comparison of linear Fresnel and parabolic trough collector systems. **Solar Energy Engineering**, v. 136, p. 11, 2014.
- SEIDEL, Á. R. **Instrumentação aplicada**. 3. ed. Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011. 106 p.
- SEN, P.K.; ASHUTOSH, K.; BHUWANESH, K.; ENGINEER, Z.; HEGDE, S.; SEN, P.V.; DAVIES, P. Linear fresnel mirror solar concentrator with tracking. **Procedia Engineering**, v. 56, p. 613 – 618, 2013. 5th {BSME} International Conference on Thermal Engineering.
- SHARMA, V.; NAYAK, J. K.; KEDARE, S. B. Effects of shading and blocking in linear fresnel reflector field. **Solar Energy**, v. 113, p. 114 – 138, 2016.
- SIDEK, M. H.M.; AZIS, N.; HASAN, W. Z.W.; Ab Kadir, M. Z. A.; SHAFIE, S.; RADZI, M. A.M. Corrigendum to “automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle contro”. **Energy**, v. 127, p. 803, 2017.
- SOUZA, C. P.; WANDERLEY, M. B. Conversion from geometrical to electrical model of lvd. In: **16th IMEKO TC4 Sumposium Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements**. Florença, Italia: [s.n.], 2008.
- SOUZA, L. E. V.; CAVALCANTE, A. M. G. Concentrated solar power deployment in emerging economies: The cases of china and brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1094 – 1103, 2017.
- SPOLADORE, M.; CAMACHO, E.; VALCHER, M. Distributed Parameters Dynamic Model of a Solar Fresnel Collector Field. **International Federation of Automatic Control (IFAC) World Congress**, v. 18, p. 6, 2011.
- SUMATHI, Vijayan; JAYAPRAGASH, R.; BAKSHI, Abhinav; Kumar Akella, Praveen. Solar tracking methods to maximize PV system output - A review of the methods adopted in recent decade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, v. 74, n. February 2016, p. 130–138, 2017. ISSN 18790690.

- TAPIA, S. D. **Estudio Técnico y Económico de una Instalación Solar con Colectores Lineales Fresnel**. 129 p. Dissertação (Mestrado) — Universidad Zaragoza, Zaragoza, Espanha, 2011.
- TIAN, G. Y.; ZHAO, Z. X.; BAINES, R. W.; ZHANG, N. Computational algorithms for linear variable differential transformers (lvdts). **IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology**, v. 144, n. 4, p. 189–192, 1997.
- TITIRSHA, T.; SIDDIQUE, A. R. M.; AFRIN, F.; SANJIDAH, S.; RABBANI, A. Introducing dual axis solar tracker with reflector to increase optimal electricity generation in bangladesh. In: **2014 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- TURLEA, M. D. **AN1183: NE/SA/SE5521 position measurement**. 1993. Disponível em: <http://noel.feld.cvut.cz/hw/philips/acrobat/8009.pdf>.
- VEIGA, C. F. de P.; J., MONTANARIN JUNIOR E. **Projeto e construção de um transdutor LVDT**. 2007. Monografia (Bacharel em Engenharia Industrial Elétrica), UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), Curitiba, Brasil.
- VELÁZQUEZ, N.; GARCÍA-VALLADARES, O.; SAUCEDA, D.; BELTRÁN, R. Numerical simulation of a linear fresnel reflector concentrator used as direct generator in a solar-gax cycle. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 3, p. 434 – 445, 2010.
- WALKER, G. S. **DEVELOPMENT OF A LOW COST LINEAR FRESNEL SOLAR CONCENTRATOR**. 136 p. Dissertação (Mestrado) — Faculty of Engineering at Stellenbosch University, Stellenbosch, África do Sul, 2013.
- WILKINSON, B. J. An improved FORTRAN program for the rapid calculation of the solar position. **Solar Energy**, v. 27, n. 1, p. 67–68, 1981.
- WU, Shang Teh; MO, Szu Chieh; WU, Bo Siou. An LVDT-based self-actuating displacement transducer. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 141, n. 2, p. 558–564, 2008.
- XIAO, G. **Mirrors of dynamic curvature for linear solar concentrators**. França, 2012. 17 p.
- YAÑEZ-VALDEZ, R.; ALVA-GALLEGOS, R.; CABALLERO-RUIZ, A.; RUIZ-HUERTA, L. Selection of soft magnetic core materials used on an LVDT prototype. **Journal of Applied Research and Technology**, v. 10, n. 2, p. 195–205, 2012.
- YILMAZ, Saban; Riza Ozcalik, Hasan; DOGMUS, Osman; DINCER, Furkan; AKGOL, Oguzhan; KARAASLAN, Muharrem. Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 43, p. 997–1005, 2015.
- YUN, D.; HAM, S.; PARK, J.; YUN, S. Analysis and design of lvdt. **Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2011 8th International Conference on**, p. 836–837, 2011.

ZAHID, Rahim. **Application note AN1182: Using the NE5521 signal conditioner in multi-faceted applications.** [S.l.], 1988.

ZHAI, H.; DAI, Y. J.; WU, J. Y.; WANG, R. Z.; ZHANG, L. Y. Experimental investigation and analysis on a concentrating solar collector using linear Fresnel lens. **Energy Conversion and Management**, Elsevier Ltd, v. 51, n. 1, p. 48–55, 2010.

ZHU, Guangdong. New adaptive method to optimize the secondary reflector of linear fresnel collectors. **Solar Energy**, v. 144, p. 117 – 126, 2017.

ZHU, G.; WENDELIN, T.; WAGNER, M. J.; KUTSCHER, C. History, current state, and future of linear fresnel concentrating solar collectors. **Solar Energy**, v. 103, p. 639 – 652, 2014.