

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO

ÁLVARO DANIEL DE OLIVEIRA

**SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR AUTOMÁTICO BASEADO EM ALGORITMO
DE POSIÇÃO SOLAR APLICADO A UM REFLETOR FRESNEL LINEAR**

São Leopoldo, dezembro de 2018

Álvaro Daniel de Oliveira

SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR AUTOMÁTICO BASEADO EM
ALGORITMO DE POSIÇÃO SOLAR APLICADO A UM REFLETOR FRESNEL LINEAR

Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –
UNISINOS como pré-requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Batista Dias (PPG Engenharia Mecânica – Unisinos)
Prof. Dr. Paulo Roberto Wander (PPG Engenharia Mecânica – Unisinos)
Prof. Dr. José de Souza (FETLSVC)

São Leopoldo, dezembro de 2018

O48s

Oliveira, Álvaro Daniel de.

Sistema de rastreamento solar automático baseado em algoritmo de posição solar aplicado a um refletor fresnel linear / Álvaro Daniel de Oliveira. – 2018.

111 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

“Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan.”

1. Energia solar. 2. Refletor fresnel linear. 3. Rastreador solar. I. Título.

CDU 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Mario Henrique Macagnan, pela orientação e por suas valiosas contribuições na realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Unisinos dos quais eu tive o privilégio de ser aluno.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Unisinos.

“O sucesso é a soma de pequenos
esforços repetidos dia após dia”. (Robert Collier)

RESUMO

O aproveitamento da energia solar pode ser uma alternativa muito importante para o atendimento da demanda cada vez maior por energia. Neste contexto, os concentradores solares acabam surgindo como uma opção bastante promissora. O presente trabalho apresenta um modelo de automação de um rastreador solar que dispensa o uso de sensores para determinação da posição do Sol. Esta determinação é feita apenas com base em aspectos astronômicos, utilizando um algoritmo para cálculo de efemérides, através do qual é possível prever a posição solar determinando os valores dos ângulos de azimute e de elevação solar através de dados de contagem de tempo constantemente atualizados por um relógio aplicado ao equacionamento programado em um módulo Arduíno. Para isso foi realizado um comparativo entre dois métodos de equacionamento de posição solar aparente, sendo um deles baseado em Duffie e Beckman (2013) e o outro o método baseado no trabalho de Reda e Andreas (2008), este último, com a vantagem de apresentar uma incerteza conhecida de $0,0003^\circ$, e a desvantagem de exigir um equacionamento muito mais complexo em relação ao primeiro método. Através de simulações para obter o valor da precisão necessária que o método de rastreamento deveria ter para se manter dentro dos limites da área de concentração do sistema absorvedor, foi verificado que apenas o segundo método poderia fornecer os valores dentro da faixa exigida de $0,2^\circ$. Para confirmar a aplicabilidade dos valores calculados na programação, foram realizadas simulações no programa Tonatiuh, além de medições realizadas diretamente nos espelhos através de um sensor de inclinação com resolução de $0,2^\circ$. Os resultados obtidos nos cálculos se mostraram satisfatórios, pois apresentaram valores muito próximos aos simulados (diferença máxima de $0,10^\circ$ entre ambos), enquanto que para os medidos, a diferença máxima para o valor calculado foi de $0,14^\circ$. Após essa confirmação, os valores de posição solar obtidos na programação passaram a ser aplicados no posicionamento de um motor de passo responsável pelo acionamento de um conjunto de 14 espelhos acoplados entre si e projetados para concentrar a radiação em um absorvedor, utilizando a tecnologia do refletor Fresnel linear. Essa movimentação utiliza apenas um acionador, baseado na observação de que os valores da diferença angular entre os espelhos se mantêm constantes ao longo do dia.

Palavras-chave: Energia solar, Refletor Fresnel linear, Rastreador solar.

ABSTRACT

The use of solar energy can be a significant alternative to meet the growing demand for energy. In this context, solar concentrators have emerged as a very promising option. This research presents a model of automation of a solar tracker that dispenses the use of sensors to determine the position of the Sun. This determination is made only based on astronomical aspects, using an algorithm for calculating ephemeris, through which it is possible to predict the solar position by determining the values of the azimuth angles and solar elevation through time counting data constantly updated by a clock applied to the equation programmed in an Arduino module. For this, a comparison was made between two equation methods of apparent solar position, one of them based on Duffie and Beckman (2013) and the other based on Reda and Andreas (2008), the latter has the advantage of having a known uncertainty of 0.0003° , and the disadvantage of requiring a much more complex equation compared to the first method. Through simulations to obtain the required accuracy value that the tracking method should have to remain within the limits of the absorber area. It was verified that only the second method could provide the values within the required range of 0.2° . To confirm the applicability of the calculated values in the programming, it was simulated in the Tonatiuh software, in addition to measurements made directly on the mirrors, through a slope sensor with a resolution of 0.2° . The results obtained in the calculations were satisfactory, since they presented values very close to the simulated ones (maximum difference of 0.1° between both), whereas for the measured ones, the maximum difference for the calculated value was of 0.14° . After this confirmation, the values obtained in the programming have been applied in the positioning of a step motor responsible for the activation of a set of 14 mirrors coupled to each other and designed to concentrate the radiation in an absorber, using the technology of Fresnel Linear Reflector. This movement uses only one trigger, based on the observation that the values of the angular difference between the mirrors remain constant throughout the day.

Keywords: Solar energy, Linear Fresnel reflector, Solar tracker.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Representação das características dimensionais entre o Sol e a Terra.	19
Figura 2-2 - Movimentação da posição do planeta Terra em torno do Sol conforme as épocas do ano.	19
Figura 2-3 - Variação anual da irradiância extraterrestre, conforme o período do ano.....	20
Figura 2-4 - Evolução do mercado de aquecedores solares no Brasil.	21
Figura 2-5 - Representação de um concentrador de calha parabólica.	22
Figura 2-6- Refletor Fresnel linear com receptor central.	23
Figura 2-7 - Refletor Fresnel linear com dois receptores.	23
Figura 2-8 - Esquema de um refletor de disco parabólico.....	24
Figura 2-9 - Esquema de um concentrador tipo torre solar.	24
Figura 2-10 - Tipos de sistemas de rastreamento.	26
Figura 2-11 - Exemplo de movimentação de um rastreador passivo.	27
Figura 2-12 - Sistemas de rastreamento utilizando fotosensores.	30
Figura 2-13 - Exemplos de mecanismos utilizados em protótipos de rastreadores. Modelo (a) utilizando um mecanismo de distribuição de força em dois pontos e modelo (b) com mecanismo em um ponto central.	31
Figura 2-14- Exemplos de sistemas de transmissão usados em rastreamento solar.....	32
Figura 2-15 - Atuadores controlando todos os espelhos de forma individual (A), um único atuador para todos os espelhos (B), ou com um atuador movimentado um grupo de espelhos(C).	33
Figura 2-16 - Representação dos ângulos da geometria solar.	34
Figura 2-17 - Projeção dos ângulos solares em um plano transversal ao eixo do espelho.....	36
Figura 2-18 – Refletor Fresnel linear e os ângulos que definem sua geometria e operação.	37
Figura 2-19 - Ângulos associados à movimentação dos espelhos.....	38
Figura 3-1- Estrutura do sistema onde foi implementado o rastreador.	39
Figura 3-2 - Esquema da vista lateral com as principais medidas consideradas do conjunto de espelhos.	40
Figura 3-3 - Diferença encontrada para valores de ângulo zênite em seis horários do dia 25/10/2018.....	42
Figura 3-4 - Diferença encontrada para valores de ângulo azimuth em seis horários do dia 25/10/2018.....	42
Figura 3-5 - Numeração considerada para cada espelho.	43

Figura 3-6 - Gráfico com a diferença do ângulo de inclinação, θ_n , para cada espelho no dia 25 de outubro de 2018 em seis horários diferentes	44
Figura 3-7 - Tubos do absorvedor e suas respectivas medidas.	44
Figura 3-8 - Reflexão da radiação pelos espelhos no absorvedor, considerando um sistema com erro de seguimento de $0,2^\circ$ (diferença entre o ângulo de inclinação θ_n teórico e o real de $3,49065$ mrad).....	45
Figura 3-9 - Vista dos sistema completo, com a aradiação observada proveniste do sol e refeltida pelos espelhos no absorvedor.	46
Figura 3-10 - Reflexão da radiação pelos espelhos no absorvedor, considerando um sistema com erro de seguimento de $0,0003^\circ$ (diferença entre o ângulo de inclinação θ_n teórico e o real de $0,0052359$ mrad).	47
Figura 3-11 - Reflexão da radiação pelos espelhos no absorvedor, considerando um sistema com erro de seguimento de $0,66^\circ$ (diferença entre o ângulo de inclinação θ_n teórico e o real de $11,519173$ mrad).....	47
Figura 3-12 - Vista de satélite do terraço do prédio onde está o Laboratório de Fontes Renováveis de Energia.	48
Figura 3-13 - Vista lateral mostrando o exemplo de posicionamento do espelho em relação ao absorvedor, considerando H como altura do centro do espelho até o absorvedor e Q_n como a distância formando um linha horizontal do espelho até o absorvedor.....	49
Figura 3-14 - Demonstração resumida da sequência lógica utilizada na programação.	50
Figura- 3-15 - variação angular dos espelhos para 5 horários calculados.	51
Figura 3-16 – Localização da Unisinos no mapa do site, com destaque no canto direito para as informação de ângulo de azimute e de elevação solar.	52
Figura 3-17 - Disposição dos dados em um display (LCD 16 x 2) com as respectivas informações de data hora , ângulo de azimute e de elevação solar.	52
Figura 3-18 - Diagrama elétrico com a ligação dos componentes.	54
Figura 3-19 - Forma gráfica da onda quadrada representando um intervalo de sequencia de pulsos.	55
Figura 3-20 - Diagrama de blocos dos componentes responsáveis pelo acionamento dos espelhos.	56
Figura 3-21 - Detalhe de um módulo Arduíno modelo Mega.	57
Figura 3-22 - Vista frontal da central de controle.	58
Figura 3-23 - Vista lateral da caixa de controle.....	58
Figura 3-24 - Configuração das chaves seletores conforme a opção de resolução.	59

Figura 3-25- Motor de passo utilizado.	60
Figura 3-26 - Sistema limitador do curso dos espelhos.....	61
Figura 3-27- Bancada de testes para utilizada para a integração dos componentes de controle e potência.	62
Figura 3-28 - Sensor de inclinação.	63
Figura 3-29- Conversor SSI-analógico.....	63
Figura 3-30 - Local de fixação do sensor de inclinação.	64
Figura 4-1 - Instrumentos usados para a verificação do ângulo de inclinação dos espelhos. ..	66
Figura 4-2 - Medição do ângulo de inclinação de cada espelho.....	67
Figura 4-3 - Tela do programa Tonatiuh com as coordenadas geográficas da instalação e com dados preparados para o dia 10 de setembro de 2018, as 14h.	69
Figura 4-4 - Tela mostrando a estrutura completa do sistema e a inclinação do espelho número sete, com 0,22791 radianos.	70
Figura 4-5- Calibração do sensor de inclinação no desempenho de granito do Laboratório de Metrologia- Unisinos –Campus São Leopoldo.	71
Figura 4-6 – Medição do ângulo θ_n através do sensor de inclinação adaptado à cantoneira....	71
Figura 4-7 - Disposição do LCD da central de controle durante a medição da inclinação dos espelhos com o sensor de inclinação.	72
Figura 4-8 - Diferença entre os valores medidos e os valores calculados para o dia 10/09/18.	73
Figura 4-9 - Diferença entre os valores medidos e os valores obtidos na simulação para o dia 10/09/18.....	74
Figura 4-10 –Concentração da radiação solar no conjunto absorvedor com os espelhos em operação.....	74
Figura 4-11 - Imagem térmica do absorvedor com os espelhos em operação.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1-Comparação entre os tipos de rastreadores mais utilizados.....	29
Tabela 3-1- Comparação entre os modelos de Duffie e Beckman (2013) e de Redas e Andreas (2008) para o cálculo dos ângulos de zênite e de azimute, para o dia 25 de outubro, em seis horários diferentes.	41
Tabela 3-2 - Diferença entre valores de ângulo de inclinação, θ_n , em graus, para cada espelho, para o dia 25 de outubro de 2018 em seis horários diferentes comparando os dois métodos apresentados.....	43
Tabela 3-3 - Dados sobre o termopar tipo K.	65
Tabela 4-1- Amostra de valores medidos em 16 de fevereiro de 2018, as 15 h através do goniômetro	68
Tabela 4-2-Valores verificados no dia 10 de setembro de 2018 às 14 h nos espelhos à oeste do absorvedor (1 a 7).	72
Tabela 4-3 -Valores verificados no dia 10 de setembro de 2018 às 14 h nos espelhos à leste do absorvedor (8 a 14).	73

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CLP	Controlador Lógico Programável
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i> (Energia Solar Concentrada)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
JN	Dia Juliano
LCD	<i>Liquid Cristal Display</i> (Display de Cristal Líquido)
LFR	<i>Linear Fresnel Reflector</i> (Refletor Linear Fresnel)
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PTC	<i>Parabolic Trough Collectors</i> (Coletor de Calha Parabólica)
RTC	<i>Real Time Clock</i> (Relógio de Tempo Real)

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

E_e Número de pulsos do Arduíno

Símbolos Gregos

α	Altura ou elevação solar [°]
γ	Ângulo azimutal da superfície [°]
θ_n	Ângulo de inclinação do espelho [°]
γ_s	Ângulo azimutal do Sol [°]
θ_z	Ângulo zenital [°]
η_s	Eficiência global do sistema [%]
β	Ângulo de inclinação da superfície em relação a horizontal [°]
λ	Posição solar [°]
ξ_n	Ângulo subentendido do Sol [°]
φ_n	Ângulo de reflexão do absorvedor [°]
φ	Ângulo de latitude local [°]

Sub-índices

n	em relação à normal
z	posição longitudinal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 ENERGIA SOLAR	18
2.1.1 Relação Terra-Sol.....	18
2.1.2 Movimento Anual da Terra.....	19
2.1.3 Definição dos Principais Termos Referentes à Radiação Solar	20
2.1.4 Coletor Solar.....	21
2.1.4.1 Contribuição Atual dos Coletores e Suas Expectativas.....	21
2.2 COLETORES CONCENTRADORES	22
2.3 RASTREAMENTO SOLAR.....	25
2.3.1 Rastreadores Passivos.....	26
2.3.2 Rastreadores Ativos	27
2.3.2.1 Sistema de Rastreamento Ativo Solar Baseado em Sensores.....	29
2.3.2.2 Sistema de Rastreamento Solar Baseado em Aspectos Astronômicos.....	30
2.3.3 Sistemas de transmissão usados em rastreadores	30
2.3.4 Relações Geométricas	33
2.3.5 Aspectos Relacionados ao Tempo	34
2.3.5.1 Dia.....	34
2.3.5.2 Hora Solar	34
2.3.6 Modelagem do movimento dos espelhos do LFR	35
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 SISTEMA DE CONTROLE	40
3.1.1 Definição do algoritmo de controle.....	40
3.1.1.1 Comparação entre os métodos	41
3.1.1.2 Análise da diferença encontrada entre os métodos para o ângulo de inclinação θ_n	43
3.1.1.3 Simulação da influência da diferença entre os dois métodos de rastreamento.....	45
<i>3.1.1.3.1 Limite de desvio apresentado para a perda de radiação no absorvedor.....</i>	<i>45</i>

3.1.1.3.2 <i>Análise da simulação do primeiro método</i>	46
3.1.2 Variáveis Envolvidas	48
3.2 INSTRUMENTAÇÃO	49
3.2.1 Método usado para a movimentação dos espelhos	50
3.2.2 Conferência dos Principais Valores de Saída	51
3.2.3 Diagrama elétrico e ligação dos componentes	53
3.2.4 Comunicação de Informações Entre a Parte lógica e o Driver do Motor	54
3.3 PASSOS PARA UTILIZAÇÃO DO SISTEMA MICROCONTROLADO	55
3.3.1 Microcontroladores	56
3.3.2 Relógio de Tempo Real	57
3.3.3 Central de Controle	57
3.3.4 Driver de Potência	59
3.3.5 Fonte de Alimentação	59
3.3.6 Motor de Passo	59
3.4 SISTEMA DE SEGURANÇA LIMITADOR DE POSICIONAMENTO DOS ESPELHOS.	60
3.5 INTEGRAÇÃO E TESTE DOS COMPONENTES	61
3.6 MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DA POSIÇÃO DOS ESPELHOS	62
3.7 CONTROLE DA TEMPERATURA MÁXIMA DO FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	65
4 RESULTADOS	66
4.1 MEDIÇÃO PRELIMINAR DO ÂNGULO DOS ESPELHOS	66
4.2 SIMULAÇÃO DOS ÂNGULOS DOS ESPELHOS	68
4.3 MEDIÇÕES COM O SENSOR DE INCLINAÇÃO	70
4.4 ANÁLISE DOS VALORES OBTIDOS	72
4.4.1 Análise visual	74
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE A-TABELA COMPARATIVAS ENTRE OS MODELOS DE EQUACIONAMENTO.	80
APÊNDICE B-PROGRAMAÇÃO NO MÓDULO ARDUÍNO	89

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial crescente por energia tem levado a sociedade a diversificar suas fontes. A preocupação constante com o aquecimento global, bem como o esgotamento dos recursos fósseis justifica a busca pela exploração de fontes renováveis de energia. Neste contexto, fontes alternativas como a energia solar estão entre as principais esperanças por um mundo mais sustentável.

De acordo com Souza e Cavalcante (2017) um modelo que tem se mostrado bastante promissor quanto ao aproveitamento da energia solar é a chamada energia solar concentrada ou CSP (*Concentrated Solar Power*), que tem como princípio de funcionamento a reflexão da radiação solar direta com o seu direcionamento em um sistema de absorção. Baseado nisso, o presente trabalho aborda o aproveitamento da energia solar através de um sistema coletor solar térmico do tipo Refletor Fresnel Linear (LFR), dotado de superfícies refletoras, instalado nas dependências da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. O sistema é composto de um conjunto de espelhos movimentados automaticamente de forma a aproveitar a maior quantidade possível de radiação solar ao longo do dia. Para atingir esse aproveitamento foi desenvolvido um sistema de rastreamento baseado em um algoritmo de posição solar, cuja base de tempo será a principal variável a ser considerada, dispensando assim o uso de sensores de radiação solar.

O presente trabalho possui dois enfoques principais. O primeiro utiliza um algoritmo para a determinação da posição solar, baseado no trabalho de Reda e Andreas (2008) que pode determinar a posição solar com incerteza de $0,0003^\circ$. O segundo faz a integração dos componentes responsáveis pela movimentação automática dos espelhos. Essa movimentação do conjunto de espelhos será executada em um único eixo, no sentido Leste–Oeste, função essa atribuída a um motor de passo. Todo o conjunto concentrará a sua radiação em um sistema absorvedor, que será responsável por converter a radiação solar em energia térmica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de rastreamento solar baseado em um algoritmo de posição solar que considera aspectos geográficos e de tempo para determinar a posição solar aparente, visando automatizar a movimentação de um conjunto de espelhos de um refletor Fresnel linear.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I. Obter, em tempo real, os ângulos de azimute e zênite através da utilização de um algoritmo de posição solar baseado em variáveis de tempo e localização geográfica;
- II. Analisar os erros dos ângulos de azimute e zênite;
- III. Avaliar o posicionamento dos espelhos comparando com os valores de saída do sistema de controle;
- IV. Verificar o tempo de resposta do motor em função do ciclo de atualização do sistema.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui um território com elevados níveis de radiação. Infelizmente essa característica ainda não é bem explorada no país. Explorar o potencial de regiões com elevada radiação solar poderia gerar um grande ganho energético e financeiro, tornando a nação menos dependente de fontes de energia finitas.

Embora os coletores solares convencionais já possam representar uma parcela considerável no aquecimento doméstico e comercial, suas temperaturas são relativamente baixas, o que inviabiliza a expansão para outras aplicações, como geração de energia elétrica ou produção de calor para processos industriais. Para utilizar sistemas solares com temperaturas mais elevadas surge como principal alternativa os chamados concentradores solares, que exigem um sistema de rastreamento da radiação solar. Lodi (2011) afirma que quanto maior a temperatura desejada para a operação, maior deve ser a razão de concentração e também mais precisa deve ser a óptica do concentrador e o sistema de orientação utilizado no rastreador.

O sistema de rastreamento utilizado nesse trabalho se baseia apenas em valores geográficos e de tempo, para determinar a localização aparente do Sol ao longo do dia,

dispensando o uso de sensores ópticos. Conforme Cavalcante (2016), na ausência de orientação de um algoritmo astronômico, os meios de observação óptica podem ter dificuldade em determinar a posição solar quando o Sol se move fora do campo de visão do sensor, ou se o caminho solar não estiver mais no campo de visão do dispositivo óptico.

Desta forma, é possível efetuar um sistema de rastreamento solar de boa confiabilidade e precisão, e sem a complexidade de um sensoriamento externo, o que tende a reduzir inclusive a frequência de eventuais ajustes ou manutenções exigidas por sensores expostos a todo o tipo de intempéries.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre os principais modelos de concentradores solares existentes. São abordadas as principais variáveis para a modelagem do rastreador: ângulos utilizados na geometria solar, aspectos de tempo (dia Juliano e tempo solar verdadeiro) e aspectos geográficos ou de localização da implantação do sistema. Também serão apresentados os principais componentes eletrônicos utilizados no sistema de rastreamento.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento do sistema de controle, seus principais parâmetros, formas de conferência e validação dos resultados, bem como a sua forma de implementação, mostrando os passos utilizados no sistema de controle do rastreador até o sistema de posicionamento dos espelhos.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através dos cálculos e comparando com o modelo simulado no software Tonatiuh e com as medições realizadas no projeto montado, enquanto que no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No estudo da energia solar a definição de alguns conceitos basilares é essencial para o desenvolvimento e compreensão do tema. Desta forma, serão apresentados os conceitos sobre energia solar, o Sol e seu movimento aparente, a relação Terra e Sol e os principais termos referentes à radiação e geometria solar.

2.1 ENERGIA SOLAR

Em geral, é referida como energia solar a energia obtida por fontes proeminentes de radiação solar, como a energia solar fotovoltaica e os coletores solares térmicos. Mas se for efetuada uma análise mais detalhada, é possível considerar que mesmo usinas hidrelétricas dependem da radiação solar, pois é a radiação a responsável pela evaporação da água e, conseqüentemente, pelo regime de chuvas, que vai promover novamente o enchimento do reservatório da usina hidrelétrica.

A energia eólica também pode ser considerada uma energia oriunda do Sol, pois é a radiação solar que induz a circulação atmosférica em larga escala, que contribui para a formação de ventos, que por sua vez serve para movimentar os aerogeradores, formando o ciclo responsável pela geração da energia eólica.

2.1.1 Relação Terra-Sol

O Sol é basicamente uma esfera extremamente quente. A sua energia é produzida através das constantes reações nucleares. É formado basicamente de hélio e hidrogênio. De acordo com Duffie e Beckman (2013), o seu diâmetro é de aproximadamente $1,39 \times 10^9$ m, sua massa é de aproximadamente $1,99 \times 10^{30}$ kg, sua densidade é de 1410 kg/m^3 , sua temperatura efetiva de corpo negro é de 5.777 K , e na região central de seu interior a temperatura estimada é entre 8×10^6 a $40 \times 10^6 \text{ K}$, sua potência emissiva do Sol é de $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$, seu período de rotação é de aproximadamente 27 dias no equador solar e 30 dias nas regiões polares, a distância média entre o Sol e a Terra é de aproximadamente $1,495 \times 10^{11} \text{ m}$, seu diâmetro é 109 vezes maior que o da Terra ($1,39 \times 10^9 \text{ m}$ contra $1,27 \times 10^7 \text{ m}$). A Fig. (2-1) ilustra alguns valores referentes a essas características.

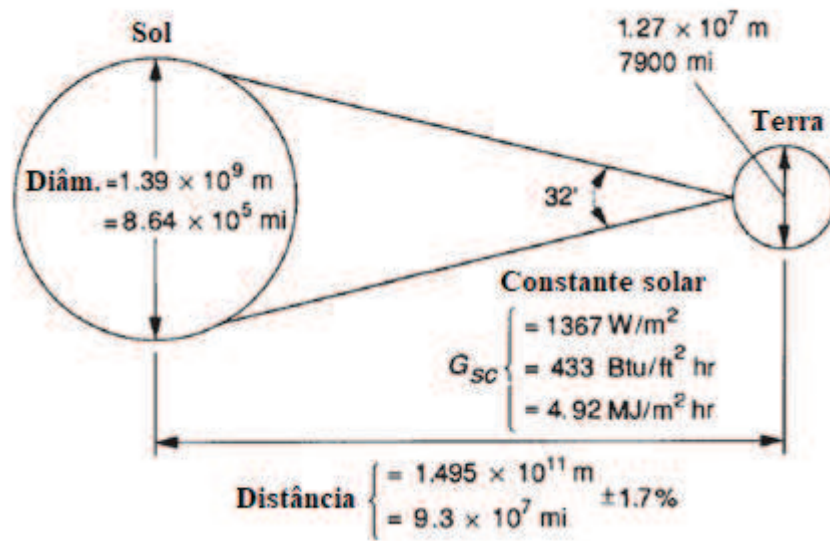


Figura 2-1 - Representação das características dimensionais entre o Sol e a Terra.

Fonte: Duffie e Beckman (2013).

2.1.2 Movimento Anual da Terra

O planeta Terra move-se em uma órbita elíptica ao redor do Sol, ao longo do ano. Quatro eventos merecem destaque nesse movimento, principalmente porque estão associados às trocas de estações. São eles: o equinócio de outono (21/03), o solstício de verão (21/02), o equinócio de primavera (21/09) e o solstício de inverno (21/06), conforme representados na Fig. (2.2).

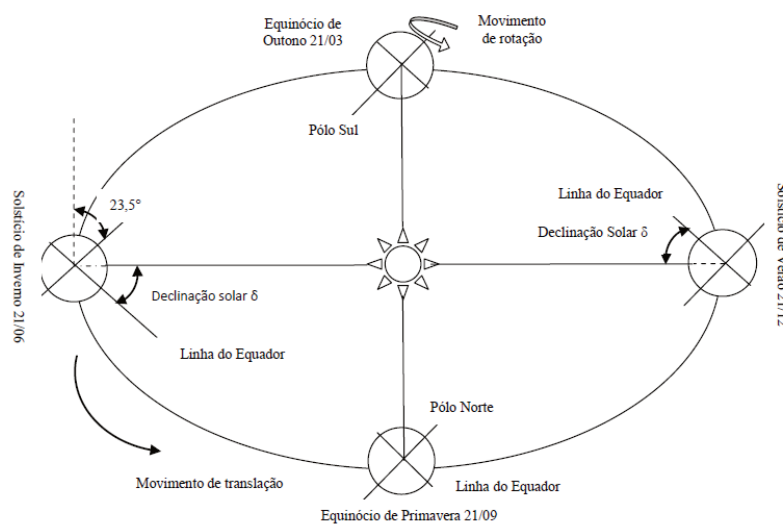


Figura 2-2 - Movimentação da posição do planeta Terra em torno do Sol conforme as épocas do ano.

Fonte: Pinho e Galdino (2014).

2.1.3 Definição dos Principais Termos Referentes à Radiação Solar

É comum utilizar o termo radiação solar para se referir a todo o fluxo de potência do espectro solar. A Fig. (2-3) se refere à irradiância solar recebida por uma superfície normal aos raios solares, no topo da atmosfera terrestre, tendo como valor médio 1.367 W/m^2 , sendo variável ao longo do ano, pelo formato elíptico da órbita terrestre em torno do Sol.

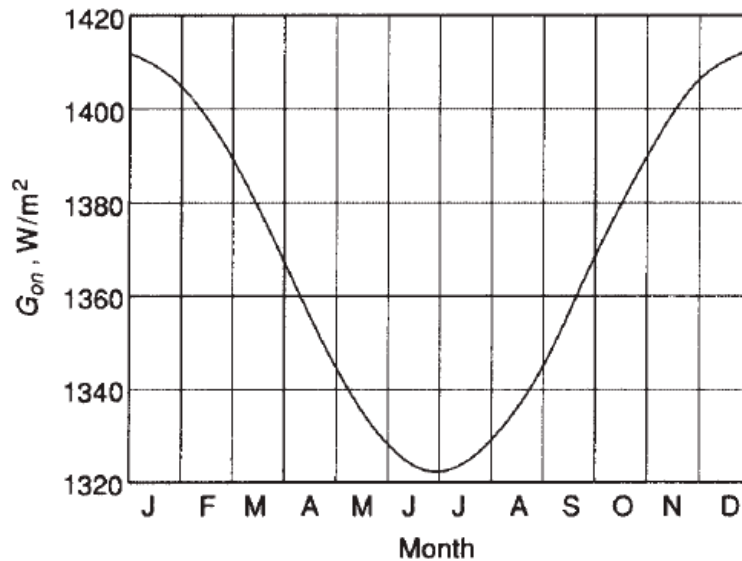


Figura 2-3 - Variação anual da irradiância extraterrestre, conforme o período do ano.

Fonte: Pinho e Galdino (2014).

Pela análise da Fig. (2-3), pode ser observado que esse valor varia entre 1.322 W/m^2 até 1.412 W/m^2 . Duffie e Beckman (2013) enfatizam alguns dos principais termos referentes à radiação solar:

- Massa de ar : É a relação da massa atmosférica atravessada pela radiação solar.
- Radiação direta: É a radiação solar recebida do Sol sem ter sido dispersa na atmosfera.
- Radiação difusa: A radiação solar recebida do Sol após sua direção ter sido alterada pelos processos de dispersão na atmosfera.
- Radiação solar global: É a soma das componentes direta e difusa da radiação solar.
- Irradiância: É a taxa na qual a energia radiante incidente sobre uma superfície por unidade de área.
- Irradiação: É a energia incidente em uma superfície, por unidade de área, encontrada pela integração da irradiância em um tempo específico, geralmente uma hora ou um dia.

2.1.4 Coletor Solar

Os coletores solares são classificados como coletores concentradores e coletores não-concentradores. Conforme Cavalcante (2016), os concentradores operam com temperaturas superiores a 100 °C e podem ser utilizados para a produção de vapor, alimentando turbinas e posterior acionamento de geradores elétricos, enquanto que os coletores não-concentradores estão associados a aplicações residenciais e comerciais de baixa temperatura, geralmente em torno de 60 °C.

2.1.4.1 Contribuição Atual dos Coletores e Suas Expectativas

As expectativas referentes aos investimentos no setor de energias alternativas, entre elas a energia solar, começaram a se propagar principalmente a partir de 1973, durante a crise do petróleo. Segundo a Revista Sol Brasil (2016), a área instalada para aquecimento solar no Brasil, utilizando coletores planos ou de tubos evacuados, chegou a 12,64 milhões de metros quadrados.

O gráfico mostrado na Fig. (2-4) apresenta a evolução do setor de aquecedores solares no Brasil nos últimos anos.

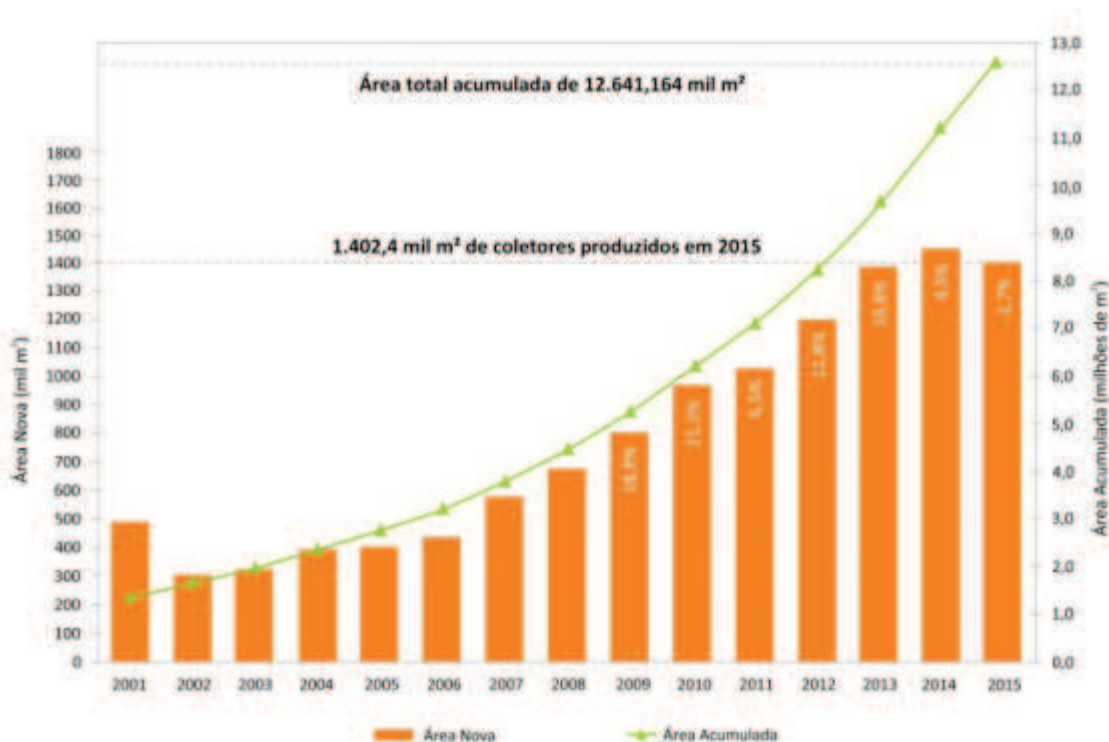


Figura 2-4 - Evolução do mercado de aquecedores solares no Brasil.

Fonte: Revista Sol Brasil (2016)

2.2 COLETORES CONCENTRADORES

Os coletores concentradores são utilizados em plantas de média e grande escala. Nas plantas CSP comerciais atuais são utilizados quatro diferentes tipos de concentradores:

- Calhas parabólicas;
- Refletor Fresnel linear;
- Disco ou prato parabólico;
- Torre solar.

Concentrador do tipo calha parabólica: Neste modelo, de acordo com Kalougirou (2004), a radiação solar é concentrada por reflexão em superfícies espelhadas de formato parabólico sobre os tubos metálicos que possuem a função de absorver a radiação e convertê-la em energia térmica. Para fornecer altas temperaturas é necessário um coletor solar de alto desempenho. Podem ser utilizados sistemas com estruturas leves e tecnologia de baixo custo para aplicações com temperaturas de até 400 °C. A Fig. (2-6) mostra as principais partes de coletor do tipo calha parabólica.

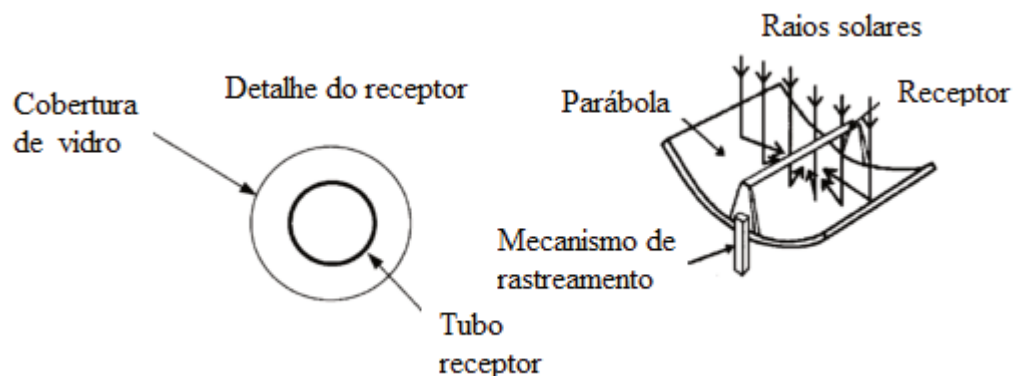


Figura 2-5 - Representação de um concentrador de calha parabólica.

Fonte: Kalougirou (2004).

Refletor Fresnel linear: A tecnologia LFR (*Linear Fresnel reflector*) é basicamente uma série de tiras de espelhos que concentram a radiação direta em um receptor linear fixo montado em uma estrutura fixa, situada acima dos espelhos. Conforme Kalougirou (2004), os LFRs podem ser considerados como um refletor parabólico fragmentado, como mostrado na Fig. (2-6), onde se utiliza um receptor central, e na Fig. (2-7) com dois receptores, um em cada extremidade. Podem ser construídos usando grandes absorvedores fixos. A maior vantagem deste tipo de sistema é que

ele usa refletores planos ou levemente curvos, que são mais baratos em comparação aos refletores parabólicos. Além disso, são montados próximos do solo, minimizando os requisitos estruturais.

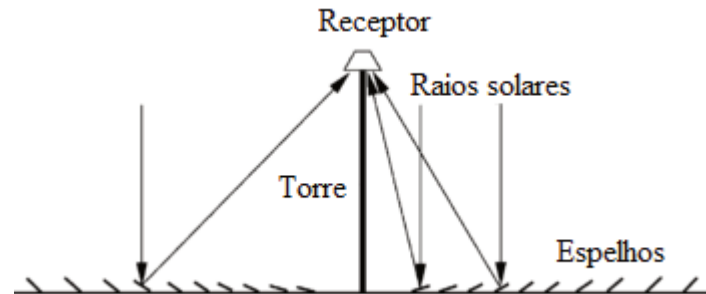


Figura 2-6- Refletor Fresnel linear com receptor central.

Fonte: Kalogirou (2004).



Figura 2-7 - Refletor Fresnel linear com dois receptores.

Fonte: Kalogirou (2004).

Disco parabólico PDR (*Parabolic Dish Reflector*): Esse tipo de coletor rastreia o Sol em dois eixos, concentrando a radiação solar em um receptor localizado no ponto focal do disco, como mostrado esquematicamente na Fig. (2-8). A estrutura do concentrador deve rastrear completamente o Sol para refletir o feixe no receptor térmico. O receptor absorve a energia solar radiante, convertendo-a em energia térmica em um fluido circulante. A energia térmica pode então ser convertida em eletricidade usando um motor Stirling no foco do concentrador. Os sistemas de disco parabólico podem atingir temperaturas superiores a 1500 °C.

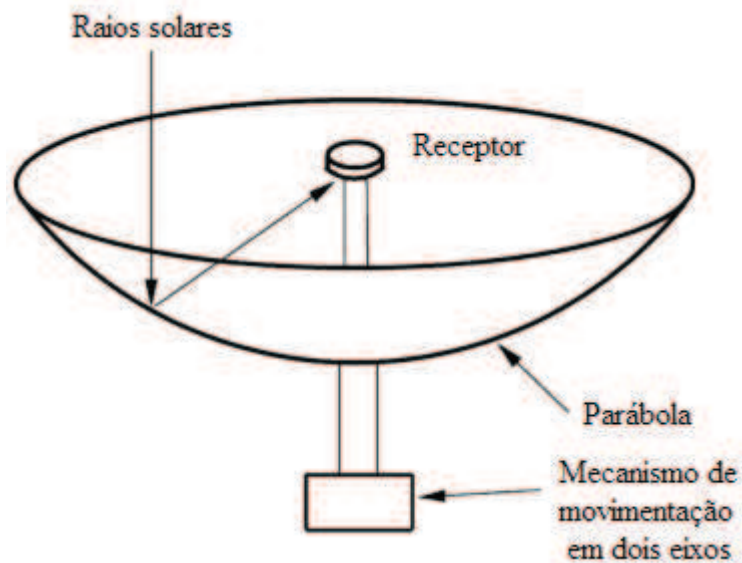


Figura 2-8 - Esquema de um refletor de disco parabólico.

Fonte: Kalogirou (2004).

Torre solar: É um sistema dotado de heliostatos que direcionam a radiação solar direta para o receptor, que absorve essa radiação e transfere sua energia para um fluido de trabalho. O sistema de transferência de calor consiste basicamente de tubos, bombas e válvulas, que direcionam o fluido em um circuito fechado entre o receptor, o armazenamento térmico e os sistemas de conversão de energia. Um sistema de armazenamento térmico armazena a energia coletada na forma de calor sensível ou latente para posterior entrega ao sistema de conversão de energia. A Fig.(2-9) apresenta um esquema de um concentrador do tipo torre solar.

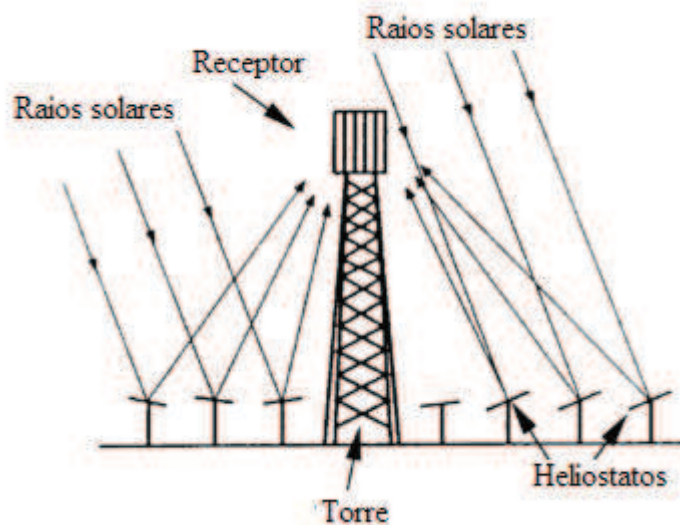


Figura 2-9 - Esquema de um concentrador tipo torre solar.

Fonte: Kalogirou (2004).

2.3 RASTREAMENTO SOLAR

Os concentradores solares, em sua maioria, são movimentados continuamente, utilizando para isso um sistema de rastreamento. Para coletores planos, devido a suas características, o rastreamento não é tão importante, sendo então montados na maioria das vezes, em estrutura fixa.

O rastreador solar, também chamado de *tracker* ou seguidor solar, utiliza métodos que conseguem alterar o posicionamento dos concentradores de forma a minimizar o ângulo de incidência solar para obter um melhor aproveitamento da radiação solar. Para que possam ser operados com eficiência, esses rastreadores devem levar em conta alguns parâmetros importantes, como características dimensionais dos concentradores, aspectos referentes à localização geográfica, horário, dia do ano, além das relações geométricas que envolvem o contexto do posicionamento solar.

Cruz (2012), cita alguns critérios que devem cumprir o dispositivo de rastreamento de um concentrador solar:

- Capacidade de seguir o Sol durante todo o dia (período de operação) e em qualquer época do ano;
- Deve seguir o Sol com uma cinemática simples a ponto de permitir a sua fácil automação.

Existem atualmente vários modelos de rastreadores solares. Com a redução dos custos dos componentes eletrônicos e a troca de informações, em um mundo cada vez mais interligado, as técnicas de implementação dos rastreadores tornaram-se muito difundidas. Custo, tamanho da instalação, precisão, aspectos geográficos, entre outros, são fatores importantes na hora de determinar qual o tipo de rastreamento deve ser aplicado a cada situação. De acordo com AL-ROUSAN, ISA, DESA (2018), os sistemas de rastreamento solar podem ser divididos em dois grupos principais denominados de sistemas de rastreamento solar ativo e passivo. Dentro destes grupos podem haver vários tipos de sistemas de controle, conforme Fig. (2-10).

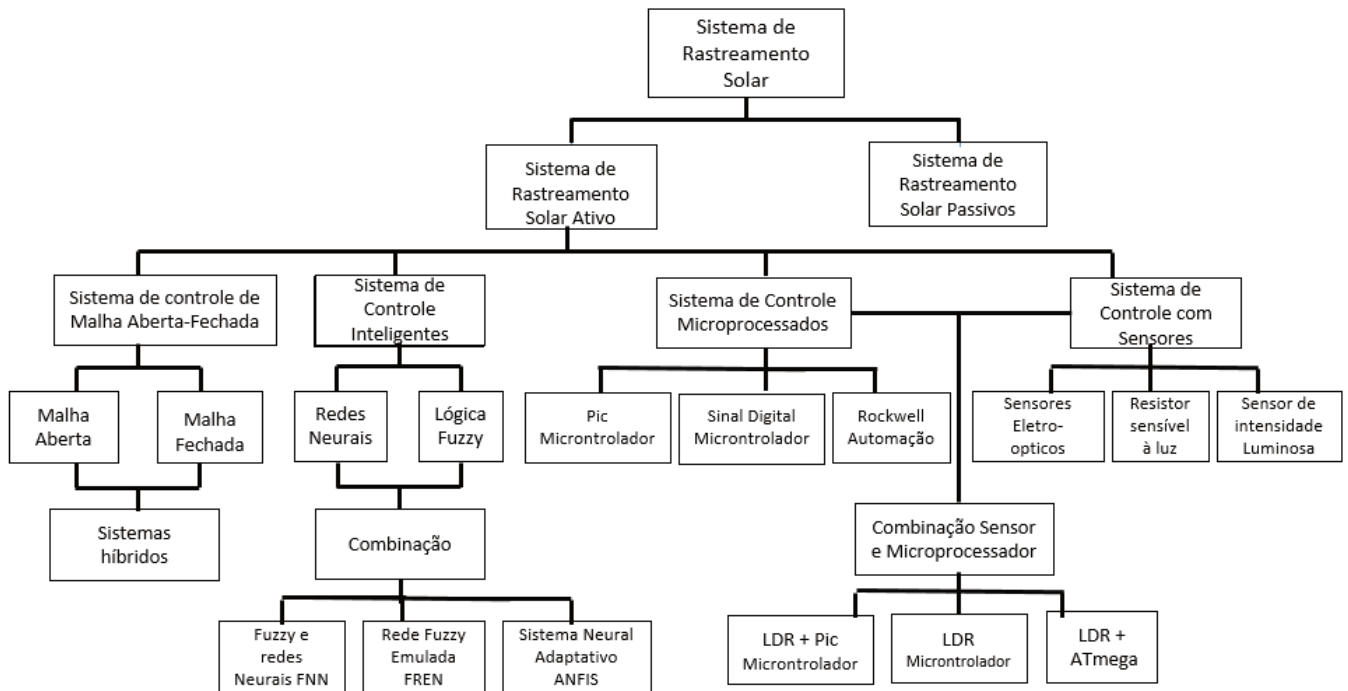


Figura 2-10 - Tipos de sistemas de rastreamento.

Fonte: Adaptado de Al-ROUSAN, ISA, DESA (2018).

2.3.1 Rastreadores Passivos

O rastreamento passivo geralmente é feito com a expansão térmica de algum fluido trabalhando dentro de atuadores. Esses dispositivos são dispostos de forma que à medida que ocorre a variação do posicionamento solar, a incidência da radiação provoca a variação de temperatura e, consequentemente, a expansão térmica do fluido presente no atuador. Essa expansão é que provoca o movimento do eixo do rastreador, conforme mostrado na Fig. (2-11). Podem ser utilizados também outros sistemas com esse propósito, como lâminas bi-metálicas e motores térmicos.

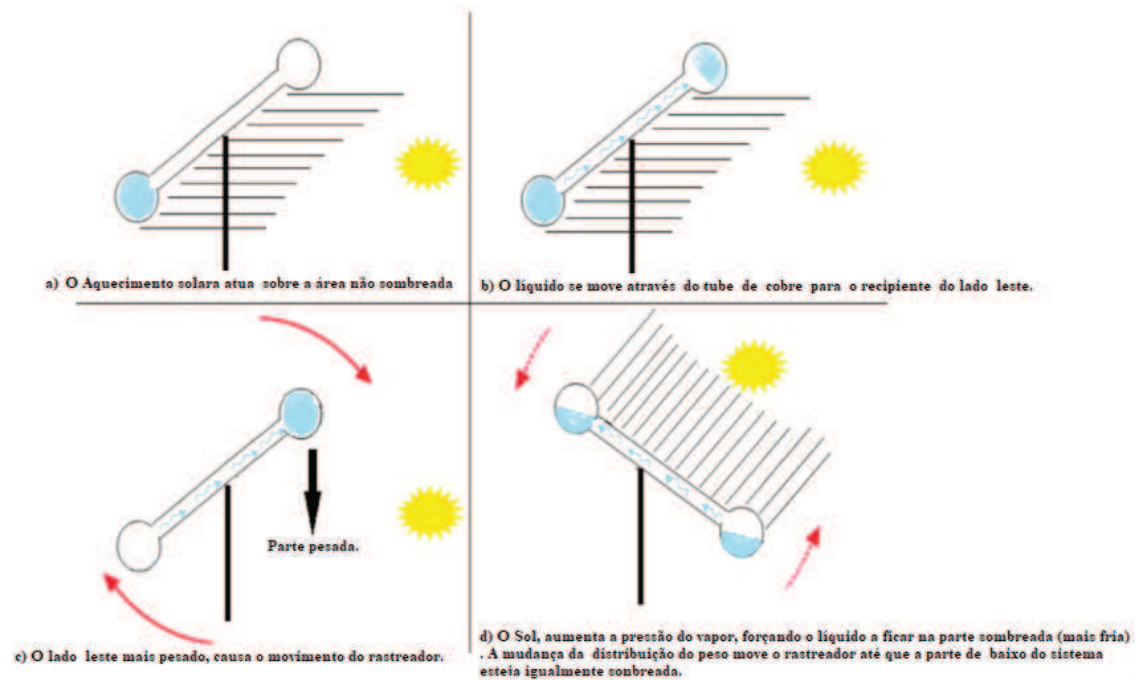


Figura 2-11 - Exemplo de movimentação de um rastreador passivo.

Fonte: Al-ROUSAN, ISA, DESA (2018).

O rastreamento passivo tem como principal característica a simplicidade. Seu uso é indicado em situações onde não se exige uma elevada precisão do rastreamento, dispensando o uso de motores, engrenagens ou controladores. As vantagens dos sistemas passivos sobre os ativos incluem a facilidade no processo de instalação, ausência de requisitos de energia externos e baixo custo de manutenção. Como principal desvantagem, Al-ROUSAN, ISA, DESA (2018) citam o fato deste tipo de sistema possuir forte dependência das variações climáticas. De acordo com Mousazadeh (2009), em baixas temperaturas esse tipo de sistema pode deixar de funcionar, inviabilizando o seu emprego em regiões muito frias.

2.3.2 Rastreadores Ativos

Um sistema de posicionamento automático ajuda a maximizar a produção de energia em plantas solares através do rastreamento contínuo da posição aparente do Sol. Lodi (2011) afirma que quanto maior a temperatura desejada para a operação, maior deve ser a razão de concentração e também mais precisos devem ser a óptica do concentrador e o sistema de orientação utilizados no rastreador. Ao contrário do que acontece em outros tipos de concentradores, no LFR os espelhos não ficam diretamente alinhados com o plano longitudinal que cruza a posição solar, pois seu posicionamento é feito de forma que a radiação direta seja refletida por cada um dos espelhos até o

absorvedor, similar à um sistema de heliostatos de um concentrador do tipo torre solar. No LFR, geralmente, é utilizado um controle ativo para o rastreador, composto de um motor elétrico para o acionamento, além de atuadores e mecanismos para a transmissão de movimento entre os espelhos. Conforme SEME, STUMBERGER, HADZISELIMOVIC (2016), os controles ativos podem ser divididos em sistema em *loop* fechado e sistema em *loop* aberto. O sistema de *loop* fechado usa um ou mais fotosensores e controles de realimentação para controlar a posição dos refletores. No sistema de *loop* aberto é utilizado um algoritmo matemático que é usado pelo controlador, responsável pelo posicionamento de cada refletor. Diversos métodos para a determinação da posição aparente do Sol são encontrados na literatura, destacando-se os trabalhos de Michalsky (1988), Blanco-Muriel et al. (2001), Duffie e Beckman (2013) e Reda e Andreas (2008). Os dois primeiros caracterizam-se por apresentar incertezas maiores que $\pm 0,01^\circ$, tanto para o ângulo de zênite, θ_z , quanto para o ângulo de azimute, γ_s . Além disso, apresentam um período para o cálculo das efemérides também limitado, 1950-2050 para o caso de Michalsky (1988) e de 1999-2015 para o caso de Blanco-Muriel et al. (2001). A determinação da posição solar pelo método de Reda e Andreas (2008), basicamente para os ângulos de zênite e de azimute, apresentam uma incerteza de $\pm 0,0003^\circ$, para o período de anos entre 2000 a.C. a 6000 d.C. No método baseado em Duffie e Beckman (2013) a obtenção destes dois ângulos é feita de uma forma que exige um método de equacionamento reduzido. Esses ângulos, junto com as informações geográficas do local (latitude e longitude) e tempo universal, permitem prever a posição solar em um determinado local de maneira relativamente simples e precisa.

Os rastreadores ativos têm como principal característica o uso de motores e sistemas de transmissão para acompanhar o posicionamento do Sol. Apesar destes modelos de rastreadores apresentarem um custo de instalação e de manutenção maior do que os sistemas passivos, têm seu uso bastante difundido pelo fato de seu desempenho não ser dependente de variações climáticas, além de apresentarem elevada precisão o que viabiliza o seu uso, principalmente em concentradores solares.

Mousazadeh et al. (2009) considera como os três principais modelos de rastreadores ativos, os rastreadores com sensores eletro-ópticos, os rastreadores controlados por data e hora e os rastreadores de placa solar independente. Fathabadi (2016) testou três modelos de rastreadores utilizando painéis fotovoltaicos, todos com sistemas mecânicos de dois eixos de rastreamento, um deles controlando o ângulo de azimute e o outro o ângulo de elevação solar. Foi efetuado o teste de rastreamento e posteriormente definido o erro apresentado por cada modelo. O primeiro modelo trata de um rastreador dotado de sensores de radiação que tem por objetivo determinar a posição

solar através da máxima radiação captada. Este sistema, segundo o autor, apresentou um erro de $0,15^\circ$.

O segundo sistema foi baseado em dados de azimuth e de elevação solar obtidos de um banco de dados via Internet. Neste caso, não houve o uso de sensores. O erro encontrado foi de $0,4^\circ$.

O terceiro modelo proposto foi baseado em dados de potência de saída do próprio módulo fotovoltaico. O controlador proposto calcula continuamente a potência de saída máxima do módulo fotovoltaico, em seguida, usa os desvios dos ângulos de altitude e de azimuth para encontrar a posição correta do Sol onde o maior valor da saída da máxima potência é obtido. Neste caso, o módulo fotovoltaico em si desempenha o papel de um sensor e o erro apresentado neste caso foi o menor ($0,11^\circ$). A Tab. (2-1) apresenta os dados dos três modelos destacados.

Tabela 2-1-Comparação entre os tipos de rastreadores mais utilizados.

Rastreador	Custo e complexidade	Precisão	Erros de rastreamento	Sensores de rastreamento	Número de eixos (sistema mecânico)
Rastreador solar de dois eixos baseado em sensor	Alto	Alta	$0,15^\circ$	Sim	2
Rastreador solar de dois eixos sem sensores	Baixo	Média	$0,4^\circ$	Não	2
Rastreador solar usando a saída de potência do módulo	Baixo	Alta	$0,11^\circ$	Não	1

Fonte: Fathabadi (2016).

2.3.2.1 Sistema de Rastreamento Ativo Solar Baseado em Sensores

Kalougirou (2004) apresenta um modelo de rastreamento utilizando sensores. O rastreamento dos coletores é controlado por um sistema que utiliza sensores sensíveis à radiação solar, separados por uma placa de sombra, que são capazes de estimar a localização solar. Qualquer desequilíbrio do sinal desses sensores é entendido, por um sistema de controle, como mudança da

posição aparente do Sol. Yilmaz et al. (2015), utilizaram inicialmente um sistema com LDRs (resistores sensíveis à luz), mostrados na Fig. (2.12), como sensores.

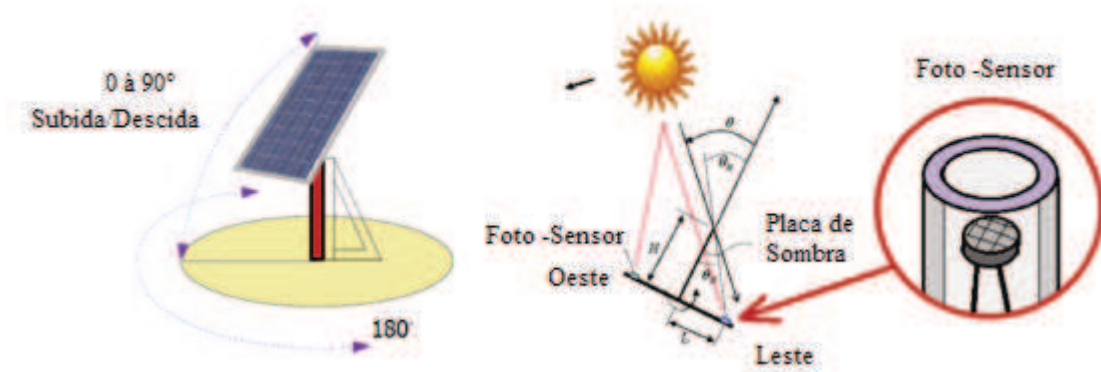


Figura 2-12 - Sistemas de rastreamento utilizando fotosensores.

Fonte: Yilmaz (2015).

2.3.2.2 Sistema de Rastreamento Solar Baseado em Aspectos Astronômicos

Conforme Yilmaz et al. (2015), o uso de microprocessadores pode dispensar o uso de sensores de radiação, pois estima a melhor localização através da escrita de um algoritmo de cálculo solar que mantenha atualizado a data e o horário. Através destes dados, um algoritmo estima o posicionamento solar fornecendo seus principais ângulos de localização (azimute e elevação solar). Sumathy et al. (2013) utilizaram o algoritmo solar proposto por Reda e Andreas (2008) para estimar a posição solar através de dados de data, hora e com a informação da localização geográfica da instalação solar, com uma precisão de $0,0003^\circ$. Al-Naima, Alir, Abid (2016) utilizaram, além de dados astronômicos, um sistema de GPS para determinar a localização do coletor.

2.3.3 Sistemas de transmissão usados em rastreadores

Os sistemas de transmissão são adotados nos modelos de rastreadores ativos, tanto para painéis fotovoltaicos como para concentradores solares térmicos. Seu principal objetivo é transmitir o movimento entre o motor e o sistema de posicionamento final (painel fotovoltaico, espelhos, etc.). Yao et al. (2014) apresentaram dois protótipos de rastreadores para o controle em dois eixos (azimute e elevação), mostrados na Fig. (2-13). O modelo (a) tem a vantagem de suportar uma carga dinâmica melhor distribuída, visto que o atuador tem a sua haste estendida no eixo conectado aos dois lados do sistema, enquanto que no modelo (b) a força atua apenas em um ponto central. As

peças que formam os dois conjuntos são descritas a seguir como (1, 2, 5, 6) formando as hastes de conexão, (3) o atuador linear (cabeça do pistão) para o movimento de elevação, (4) o atuador linear (cilindro de pistão) para o movimento de elevação, (7) suporte de rotação segurando o coletor solar, (8, 11) polias, (9) atuador linear (cabeça do pistão) para movimento secundário, (10) correia, (12) atuador linear (cilindro de pistão) para movimento secundário, (13) armação de suporte para coletores solares, (14) painel solar, (15) eixo secundário, (16) eixo primário.

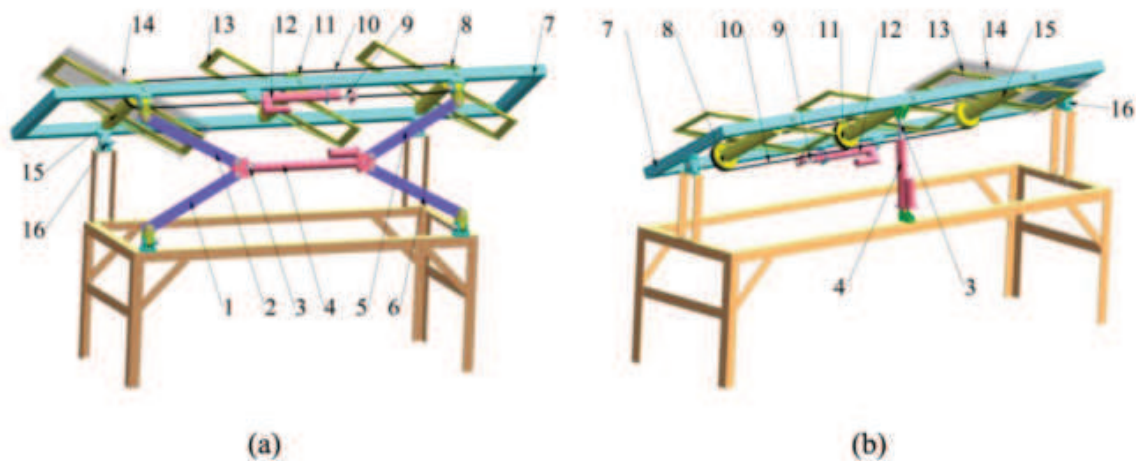


Figura 2-13 - Exemplos de mecanismos utilizados em protótipos de rastreadores. Modelo (a) utilizando um mecanismo de distribuição de força em dois pontos e modelo (b) com mecanismo em um ponto central.

Fonte: Yao et al. (2014).

Entre os aspectos relevantes exigidos em um bom sistema de transmissão está a precisão, garantida pela integridade do movimento transmitido do motor ao sistema, além da capacidade de travamento automático da sua posição, evitando dessa forma que o motor fique sempre energizado para manter o posicionamento. Nos sistemas que apresentam travamento automático, o motor utilizará energia apenas durante a mudança de posição, permitindo assim que essa seja mantida mesmo com o motor desligado, o que reduz consideravelmente o consumo de energia do motor além de prolongar a sua vida útil. Prinsloo e Dobson (2015) destacam que os sistemas de transmissão de sistema planetário normalmente conduzem o movimento em alta velocidade de transmissão além de possuírem recursos integrados de autobloqueio e de baixa folga. A Fig. (2-14) mostra alguns modelos de sistemas de transmissão usados no rastreamento solar.

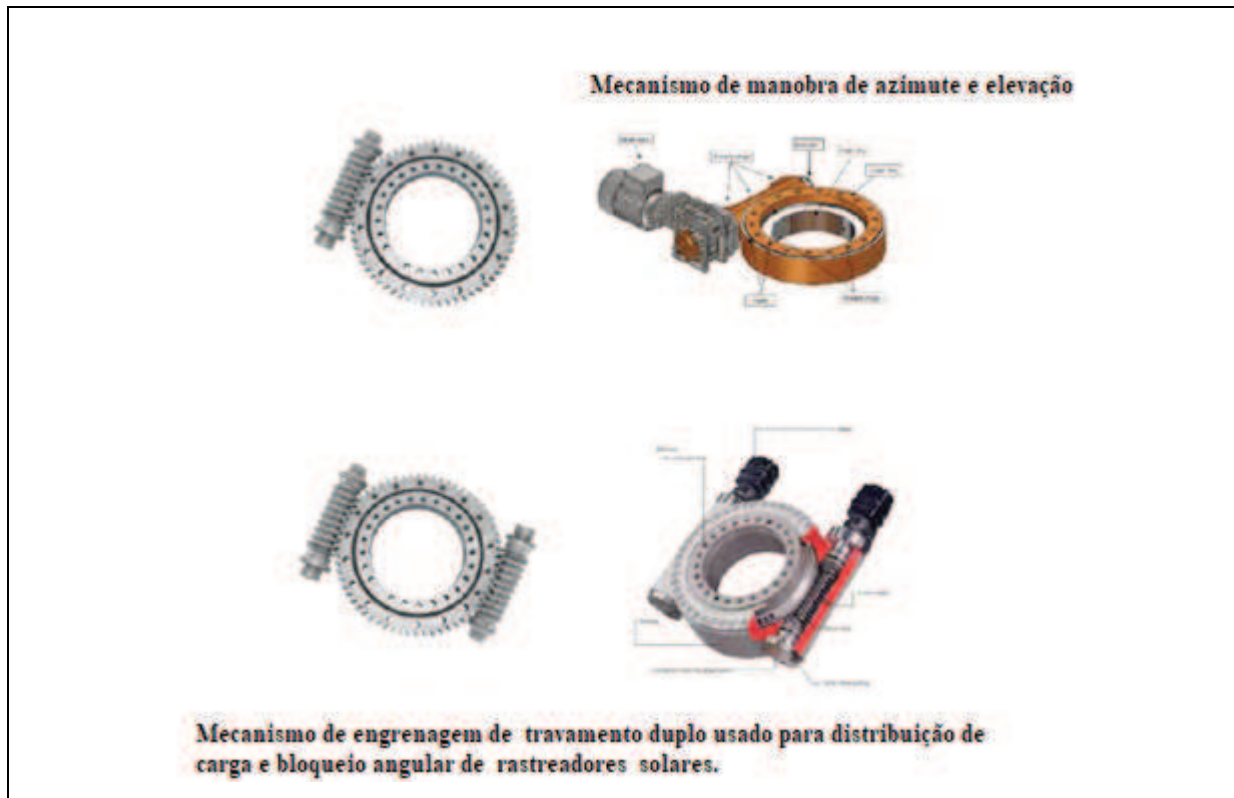


Figura 2-14- Exemplos de sistemas de transmissão usados em rastreamento solar.

Fonte: Adaptado de Prinsloo e Dobson (2015).

Outro fator importante na hora de escolher o sistema de transmissão adotado é o número de atuadores por espelho. O controle pode envolver apenas um atuador para todos os espelhos do sistema, atuador individual, ou um atuador por grupo de espelhos. A Fig. (2-15) mostra os modelos de controle conforme o número de atuadores utilizados. Platzer et al. (2016) destacam como vantagem de haver um maior número de atuadores a possibilidade de maior flexibilização do sistema mostrando, por exemplo, que alguns espelhos podem ser desfocados para um melhor controle de temperatura. Por outro lado, um atuador apenas controlando todos os espelhos simplifica o processo de rastreamento, além de apresentar um custo menor.

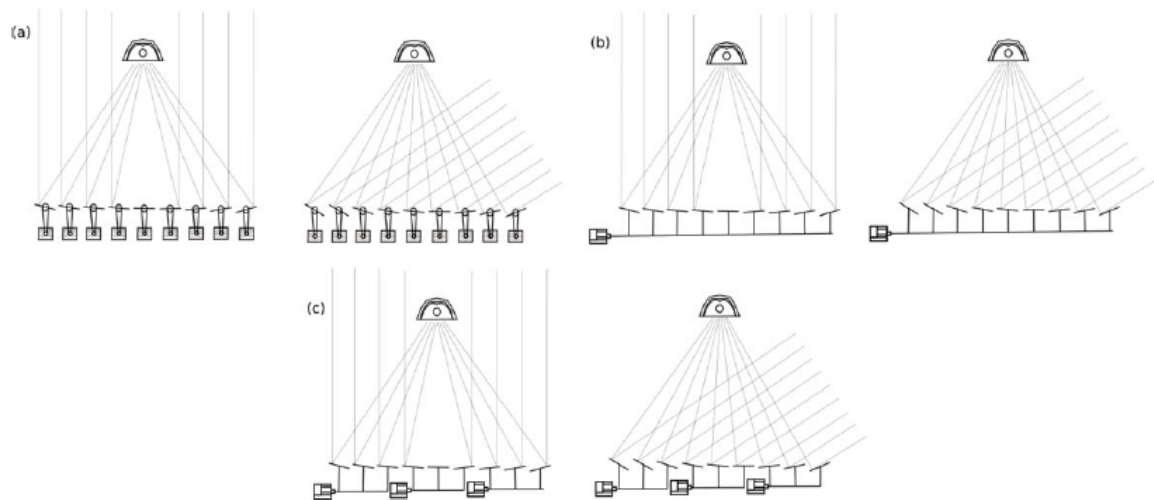


Figura 2-15 - Atuadores controlando todos os espelhos de forma individual (A), um único atuador para todos os espelhos (B), ou com um atuador movimentado um grupo de espelhos (C).

Fonte: Adaptado de Platzer et al. (2016).

2.3.4 Relações Geométricas

Ao longo de um dia e também ao longo de um ano, o Sol executa movimentos aparentes, formando os ângulos entre a posição central do Sol e uma referência associada ao tipo de coletor solar. Duffie e Beckman (2013) citam os principais aspectos geométricos a serem considerados na análise de um sistema de rastreamentos solar.

- Ângulo zenital (θ_z): formado entre os raios do Sol e a linha vertical local, ortogonal ao solo (zênite);
- Altura ou ângulo de elevação solar (α): ângulo formado entre o vetor Terra-Sol e o plano horizontal;
- Ângulo azimutal do Sol (γ_s): conhecido como azimuth solar, é o ângulo entre a projeção do vetor Terra-Sol no plano horizontal e a direção norte-sul, partindo do Norte (180°), positivo no sentido oeste e negativo no sentido leste;
- Ângulo azimutal da superfície (γ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção norte-sul, partindo do Norte (180°), negativo no sentido leste e positivo no sentido oeste;
- Inclinação do coletor ou do elemento de reflexão (β): ângulo entre o sistema a ser analisado e o plano horizontal;

- Ângulo de incidência (θ): ângulo entre o vetor Terra-Sol e a normal da superfície do coletor. A representação geométrica desses ângulos pode ser vista na Fig. (2.16).

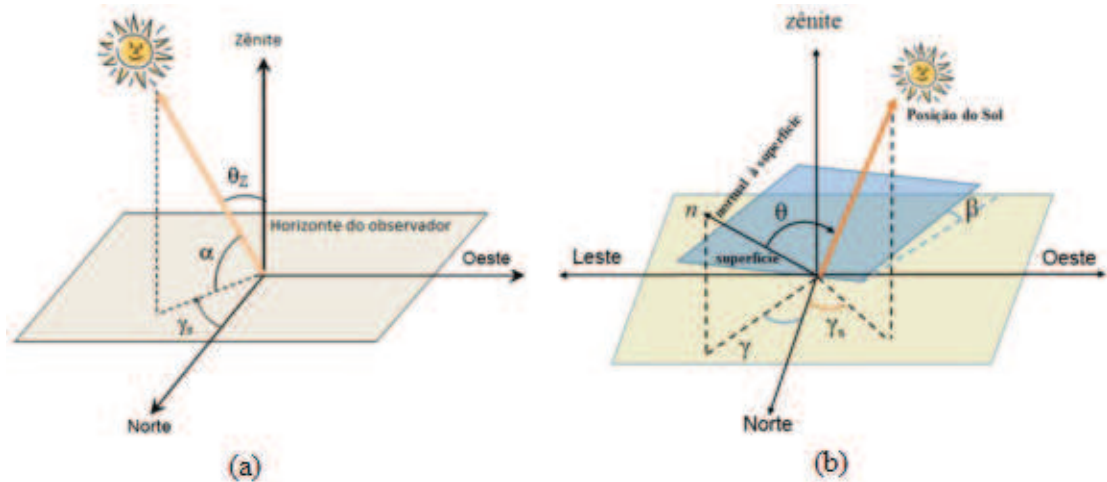


Figura 2-16 - Representação dos ângulos da geometria solar.

Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

2.3.5 Aspectos Relacionados ao Tempo

Os aspectos de tempo envolvem basicamente o dia do ano, levando em conta o calendário Juliano e a hora solar. Esses dados são constantemente atualizados com o auxílio de um circuito eletrônico formando um relógio de tempo real eletrônico (RTC), em conjunto com um módulo microcontrolado, programado com um algoritmo de rastreamento solar.

2.3.5.1 Dia

Dia a ser considerado segue uma sequência que é incrementada de 1 até 365, considerando valores intermediários entre um dia e outro. Cada dia é contado como um inteiro, cada hora é contada como a vigésima quarta parte do dia e, seguindo a mesma lógica, cada minuto e cada segundo também são considerados na contagem. Desta forma, a passagem de 1 dia e 12 horas representaria na contagem geral do programa como o incremento de 1,5 dias.

2.3.5.2 Hora Solar

Hora solar ou tempo solar verdadeiro (TVS) é o horário em que de fato se obtém a posição correta do Sol. O meio dia solar é considerado o momento em que o Sol cruza o meridiano de referência do observador. Há uma diferença entre a hora solar e a hora oficial. Esta diferença se

deve ao fato de que o Sol leva em torno de quatro minutos para cruzar um grau, além da própria perturbação causada pela taxa de rotação da Terra, que também modifica o tempo em que o Sol cruza o meridiano do observador. Desta forma, efetua-se um cálculo para compensar a diferença causada por esses dois fatores.

O TSV pode ser calculado através da Eq. (2.1):

$$TVS = To + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.1)$$

onde To é o tempo oficial, L_{st} é a longitude padrão (da hora oficial), L_{loc} é a longitude do local e E é a equação do tempo, dada pela Eq. (2.2):

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868\cos B - 0,001868\cos B - 0,032007\sin B - 0,014615\cos 2B - 0,04089\sin 2B) \quad (2.2)$$

onde B é dado pela Eq. (2.3):

$$B = (N - 1) \frac{360}{365} \quad (2.3)$$

onde N é o dia do ano.

A correção considerada na longitude pode ser positiva ou negativa. Ela é positiva quando a localização considerada está a leste do meridiano padrão (meridiano de Greenwich) e negativa quando está a oeste deste meridiano.

2.3.6 Modelagem do movimento dos espelhos do LFR

Considerando a movimentação em apenas um eixo, a modelagem do movimento dos espelhos do refletor Fresnel linear deve determinar, para cada instante, a inclinação de cada um dos espelhos do conjunto refletor, de acordo com a posição do Sol e da posição de cada espelho em relação a uma referência central, nesse caso, a posição do absorvedor. A inclinação de cada espelho permite que, independentemente da posição do Sol, a radiação irá ser refletida até o plano de abertura do absorvedor.

Para um refletor Fresnel linear orientado no eixo norte-sul, os espelhos devem se movimentar no sentido leste-oeste, como representado na Fig. (2-17). Nessa figura, $\mathbf{V}$ é o vetor que une o centro do espelho com o Sol. A sua posição instantânea em relação à normal a uma superfície

horizontal é dada pelo ângulo de zênite, θ_z . A projeção desse vetor no plano horizontal em relação ao norte verdadeiro define o ângulo de azimuth solar, γ_s . A projeção do vetor $\mathbf{V}$ em um sistema de coordenadas ortogonais fornece então os três vetores, conforme as Eq. (2.4) a (2.6):

$$V_x = V \sin \theta_z \cos \gamma_s \quad (2.4)$$

$$V_y = V \sin \theta_z \sin \gamma_s \quad (2.5)$$

$$V_z = V \cos \theta_z \quad (2.6)$$

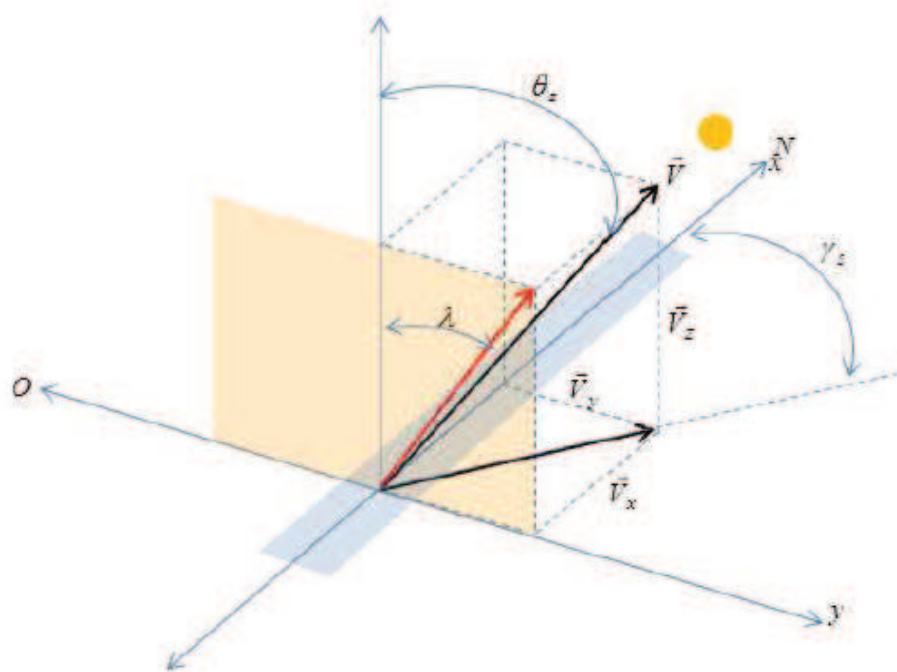


Figura 2-17 - Projeção dos ângulos solares em um plano transversal ao eixo do espelho.

Fonte: Muller (2016).

Assim, o vetor $\mathbf{V}$ projetado em um plano transversal ao eixo dos espelhos é chamado de ângulo de incidência dos espelhos, λ , e é calculado pelas Eq. (2.7) e (2.8):

$$\tan \lambda = \frac{\sin \lambda}{\cos \lambda} = \frac{V_x}{V_z} = \frac{V \sin \theta_z \sin \gamma_s}{V \cos \theta_z} = \frac{\sin \theta_z \sin \gamma_s}{\cos \theta_z} \quad (2.7)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_z \sin \gamma_s}{\cos \theta_z} \right) \quad (2.8)$$

Na Fig. (2.18) é mostrado um corte transversal de um refletor Fresnel linear, utilizando uma representação similar à de Muller (2016). Nesta figura são apresentados o ângulo de incidência projetado, λ , o ângulo formado pela linha vertical localizada no centro do absorvedor e o centro do espelho ou ângulo de reflexão, φ_h , a distância entre o centro do espelho e o centro do absorvedor,

Q_n , a distância entre as extremidades de dois espelhos contíguos, S_n , a largura do espelho, W e o ângulo de inclinação de cada espelho, θ_n .

O método utilizado considera que a radiação proveniente do Sol atinja o centro do espelho, cuja inclinação a cada instante permite a reflexão desta radiação para o centro do absorvedor, situado a uma altura H em relação ao plano contendo o eixo dos espelhos.

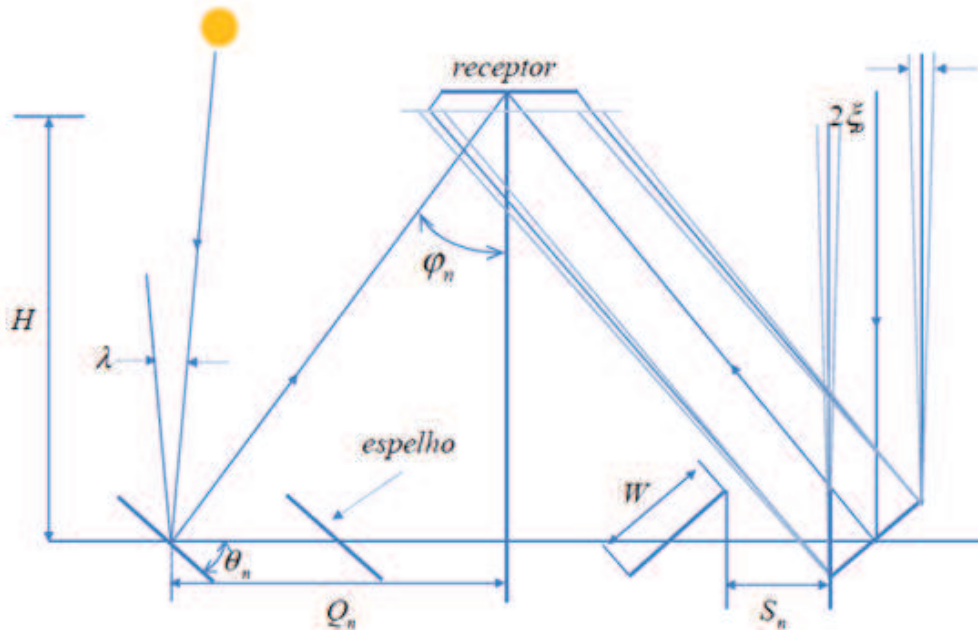


Figura 2-18 – Refletor Fresnel linear e os ângulos que definem sua geometria e operação.

Fonte: Muller (2016).

Considerando a geometria mostrada na Fig. (2-19) e que o espelho seja um refletor perfeito para um raio proveniente do disco solar, considerado como um ponto e incidente na superfície do espelho com um ângulo ζ_n em relação a normal a essa superfície, o raio é refletido com o mesmo ângulo ζ_n de incidência, de acordo com a lei de Snell.

Para que esse raio atinja o plano do absorvedor é necessário que o espelho tenha, em relação a horizontal, uma inclinação θ_n . Considerando um espelho situado a uma distância Q_n do centro do absorvedor e que o absorvedor esteja situado a uma altura H do plano do eixo dos espelhos, o ângulo de reflexão no absorvedor será obtido pelas Eq. (2.9) e (2.10):

$$\tan \varphi_n = \frac{\sin \varphi_n}{\cos \varphi_n} = \frac{Q_n}{H} \quad (2.9)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{Q_n}{H} \right) \quad (2.10)$$

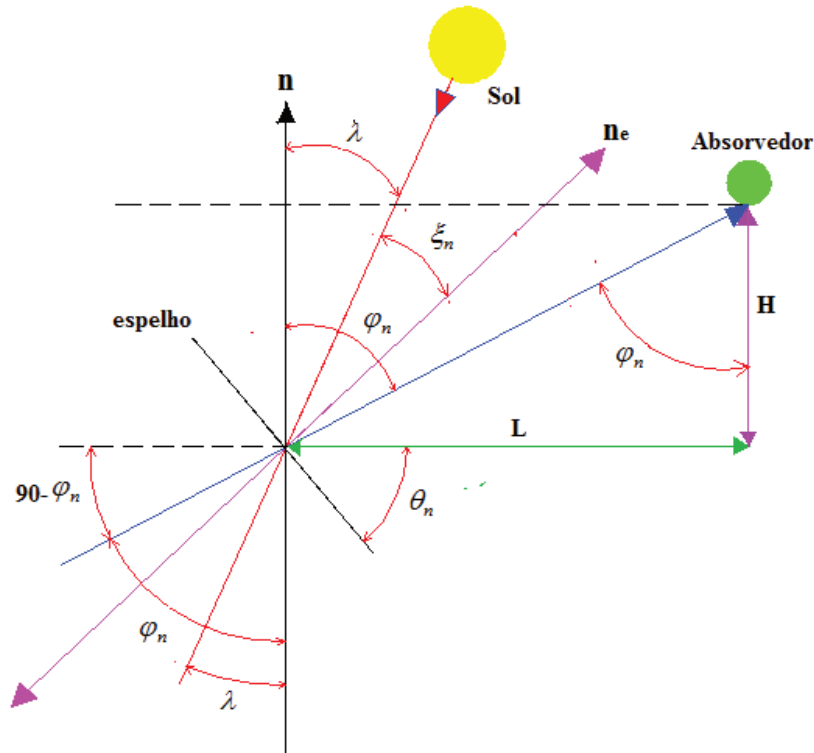


Figura 2-19 - Ângulos associados à movimentação dos espelhos.

O ângulo de reflexão, ξ_n , pode ser obtido pela Eq. (2.11) a partir da Eq. (2.12):

$$\varphi_n = \lambda + 2\xi_n \quad (2.11)$$

$$\xi_n = \frac{\varphi_n - \lambda}{2} \quad (2.12)$$

O ângulo de inclinação no espelho, θ_n , pode ser obtido pela diferença entre os ângulos φ_n e ξ_n conforme a Eq. (2.13):

$$\theta_n = \varphi_n - \xi_n = \varphi_n - \frac{\varphi_n - \lambda}{2} \quad (2.13)$$

Cada fileira de espelhos aumenta a inclinação, a partir do espelho central em direção às extremidades do coletor, cuja variação angular é igual para todos os espelhos. De acordo com Muller (2016), essa observação é importante, pois permite a utilização de apenas um motor central para movimentar todo o conjunto.

3 METODOLOGIA

A implantação do rastreador foi efetuada em um LFR montado no terraço do Laboratório de Fontes Renováveis de Energia, da Unisinos. O sistema é composto por um conjunto de 14 fileiras de espelhos. Cada fileira é formada por 3 espelhos. Cada espelho possui largura de 300 mm e comprimento de 2 m. Como os espelhos estão fixados um ao lado do outro, o comprimento total de cada fileira de espelhos é de 6 m. Cada fileira pode ser girada devido ao sistema de mancais montado abaixo de cada conjunto. A Fig. (3-1) mostra a estrutura com o absorvedor e o conjunto de espelhos já montados. A Fig. (3-2) mostra a vista lateral da estrutura com as principais medidas do conjunto.



Figura 3-1- Estrutura do sistema onde foi implementado o rastreador.

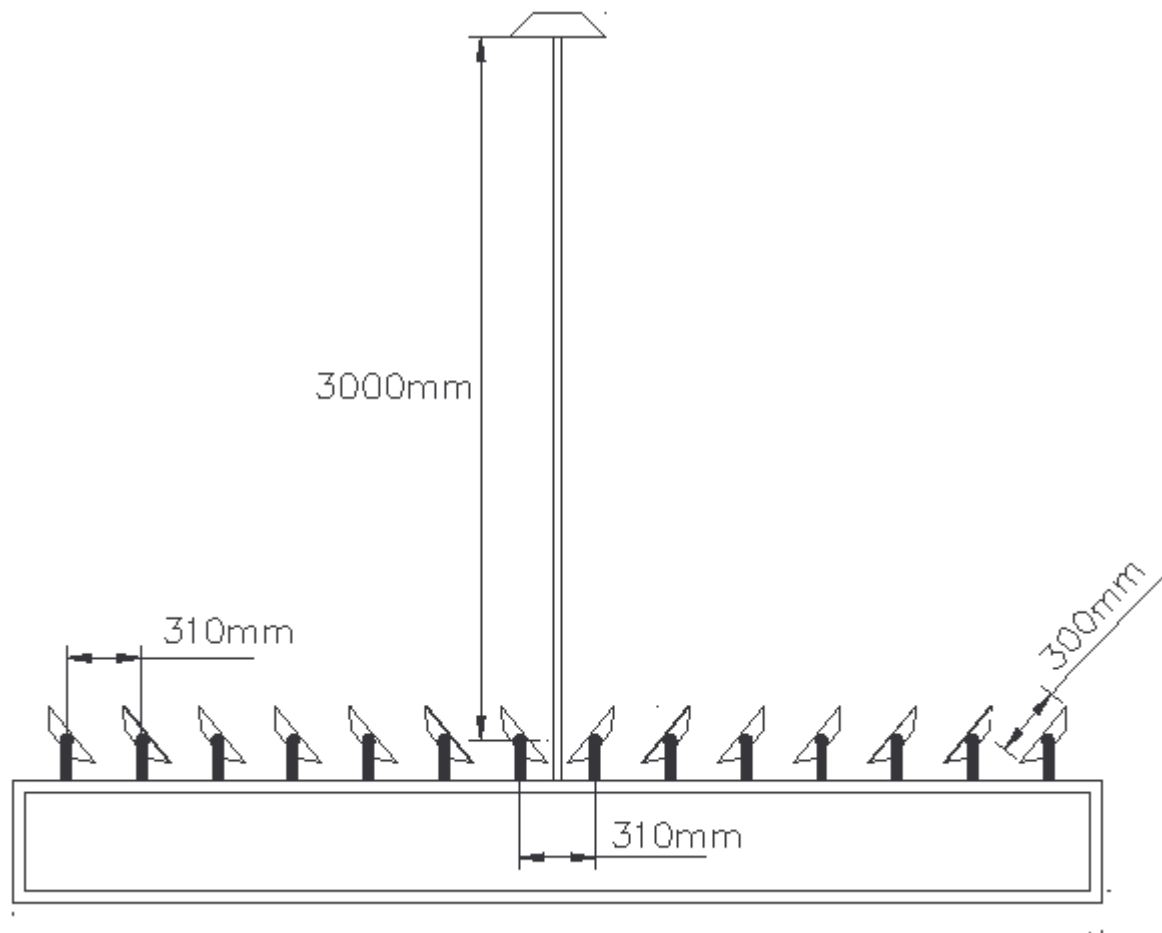


Figura 3-2 - Esquema da vista lateral com as principais medidas consideradas do conjunto de espelhos.

3.1 SISTEMA DE CONTROLE

A movimentação dos espelhos foi realizada em apenas um eixo baseada nos parâmetros que levam em conta os aspectos geográficos, dimensionais e de tempo. O processamento das informações é realizado por um sistema microcontrolador (módulo Arduino), atualizando automaticamente o posicionamento dos espelhos através de um motor de passo.

3.1.1 Definição do algoritmo de controle

Dentre os modelos de equacionamento citados na seção 2.3.2 os, que mais combinam com a proposta do trabalho são os baseados no método de Reda e Andreas (2008) e de Duffie e Beckman (2013). O primeiro modelo se caracteriza por apresentar um valor de erro máximo conhecido para

os ângulos de Zênite e de Azimute extremamente baixo ($0,0003^\circ$). Por outro lado, este método apresenta um equacionamento mais complexo, exigindo desta forma um maior tempo de programação, bem como um sistema de processamento mais sofisticado (seção 3.1). O segundo tem como principal vantagem apresentar um sistema de cálculo com um número reduzido de equações exigindo, desta forma, que o algoritmo de programação seja mais simples. Entretanto, para analisar a sua possibilidade de uso, é necessário verificar se a diferença entre este método em relação à primeira opção não seja significativa a ponto de levar a uma perda de potência do sistema. Desta forma, foram realizadas comparações entre os métodos em diferentes épocas do ano e, através dos maiores desvios obtidos, foram efetuadas as simulações de concentração solar. Os dias escolhidos tiveram um intervalo aproximado de três meses entre ambos, com o objetivo de abranger as quatro estações climáticas, sendo estes: 15 de Janeiro de 2018 (Verão), 25 de Abril de 2018 (Outono), 25 de Julho de 2018 (Inverno) e 25 de Outubro de 2018 (Primavera). Em cada dia foram definidos seis horários para análise: 8 h, 10 h, 12 h, 14 h, 16 h e 18 h.

3.1.1.1 Comparação entre os métodos

Fazendo os cálculos para cada método e analisando os dados considerando os períodos mencionados, os valores que apresentaram a maior diferença entre os métodos foram verificados no dia 25 de Outubro, conforme a Tab. (3-1), onde se percebe a maior diferença entre os métodos no horário das 14 h para o ângulo de azimute ($0,62^\circ$) e no horário das 12 h ($0,38^\circ$) para o ângulo de zênite. Os valores para as diferenças em cada um dos seis horários também são mostrados na Fig. (3-3) para o ângulo zênite e na Fig. (3-4) para ângulo de azimute solar.

Tabela 3-1- Comparação entre os modelos de Duffie e Beckman (2013) e de Redas e Andreas (2008) para o cálculo dos ângulos de zênite e de azimute, para o dia 25 de outubro, em seis horários diferentes.

Data	Método Aplicado				Diferença encontrada	
25/10/2018	Duffie e Beckman		Redas e Andreas			
Hora oficial	Zênite	Azimute	Zênite	Azimute	Zênite	Azimute
08:00	29,91	273,26	30,08	272,91	-0,17	0,35
10:00	55,18	294,17	55,4	293,65	-0,22	0,52
12:00	71,93	353,19	72,31	353,04	-0,38	0,15
14:00	58,53	298,67	58,8	298,25	-0,27	0,62
16:00	33,64	275,57	33,87	275,11	-0,23	0,46
18:00	7,69	260,73	8,03	260,31	-0,34	0,42

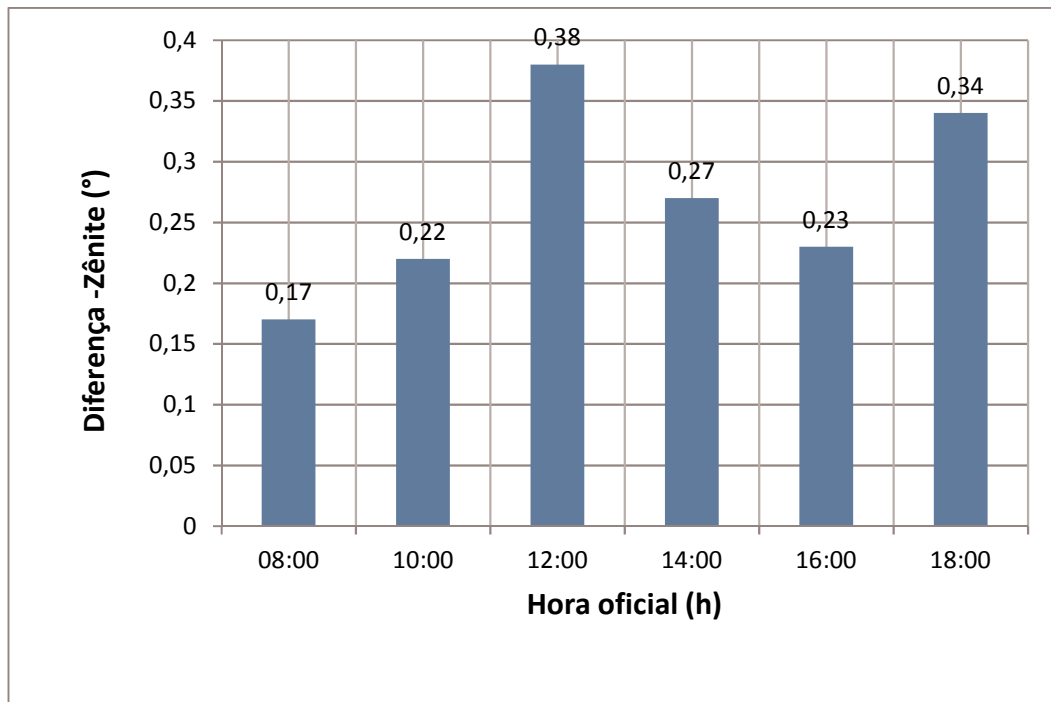


Figura 3-3 - Diferença encontrada para valores de ângulo zênite em seis horários do dia 25/10/2018.

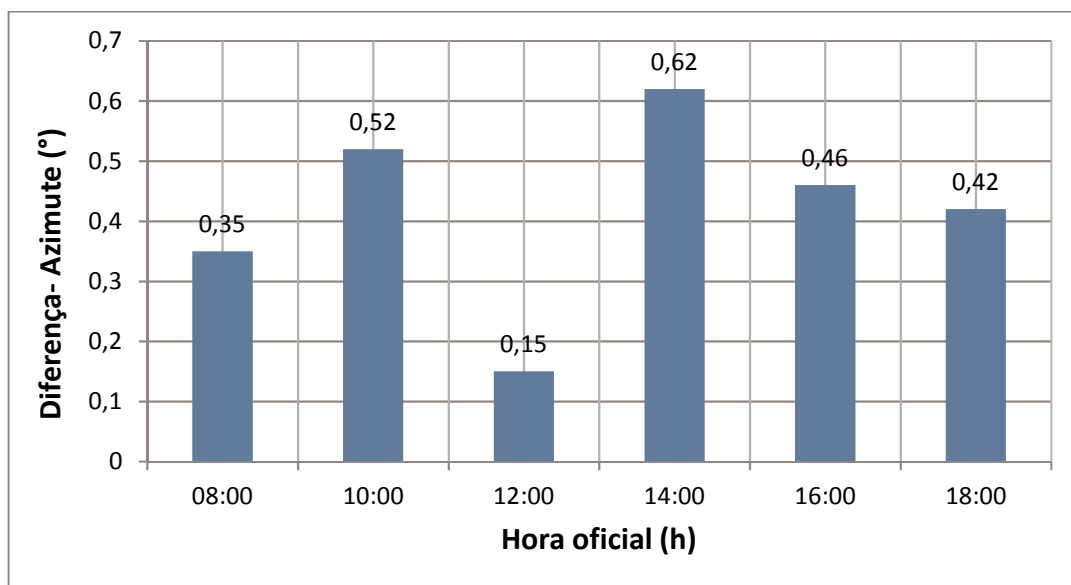


Figura 3-4 - Diferença encontrada para valores de ângulo azimute em seis horários do dia 25/10/2018.

3.1.1.2 Análise da diferença encontrada entre os métodos para o ângulo de inclinação θ_n

Foi realizado o cálculo também para determinar qual seria a influência da diferença dos ângulos solares mostrados na Tab. (3-2) (para o dia 25 de outubro) no ângulo de inclinação dos espelhos, θ_n . Esses valores são mostrados também na Fig. (3-6) e determinam a maior diferença entre os métodos no horário das 14 h com valores entre 1,45° e 1,46°, e 18h, com valores variando entre 0,65° e 0,66°. A referência numérica dos espelhos é mostrada na Fig. (3-5), onde é verificado também que a ordem é crescente do sentido Oeste para o Leste.

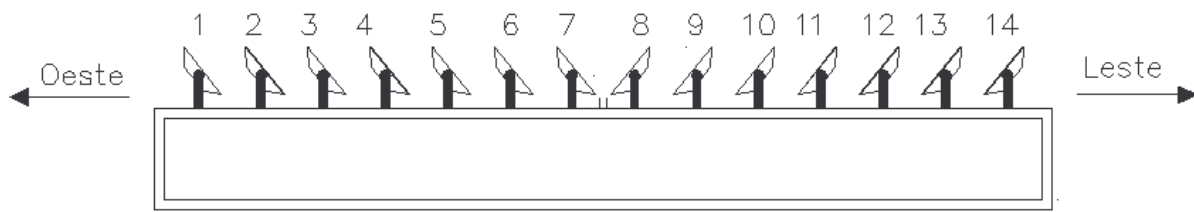


Figura 3-5 - Numeração considerada para cada espelho.

Tabela 3-2 - Diferença entre valores de ângulo de inclinação, θ_n , em graus, para cada espelho, para o dia 25 de outubro de 2018 em seis horários diferentes comparando os dois métodos apresentados.

	Número do Espelho													
Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08h	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,09	-0,08	-0,08
10h	-0,05	-0,05	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,06	-0,06	-0,05	-0,06	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05
12h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,01	-0,01	0	0	0
14h	-1,46	-1,45	-1,45	-1,46	-1,46	-1,45	-1,45	-1,46	-1,45	-1,45	-1,45	-1,45	-1,45	-1,45
16h	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24
18h	0,65	0,65	0,66	0,65	0,65	0,65	0,66	0,65	0,65	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65

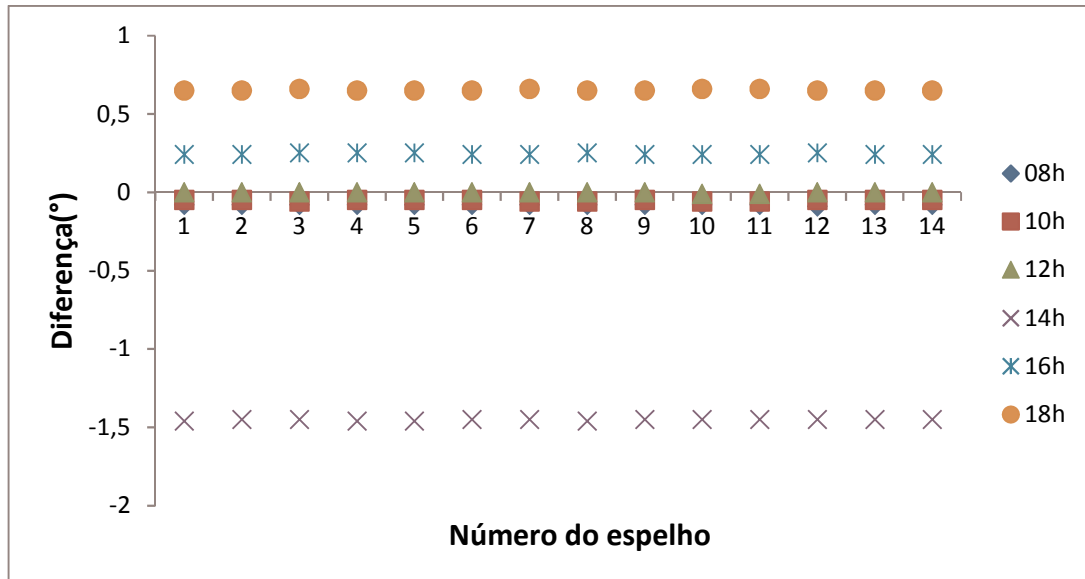


Figura 3-6 - Gráfico com a diferença do ângulo de inclinação, θ_n , para cada espelho no dia 25 de outubro de 2018 em seis horários diferentes.

A partir dos valores encontrados, sobretudo os que mostraram a maior diferença verificada no ângulo θ_n , é possível efetuar a simulação da radiação solar refletida pelos espelhos no absorvedor, utilizando o software SolTrace e assim estimar se haverá perda de radiação significativa causada pelos desvios observados. Os raios refletidos devem ficar concentrados entre os tubos do absorvedor. Cada tubo possui a medida padrão de 1", cujo valor do seu diâmetro externo é de 1,315", que equivale a 33,401 mm. A medida total da soma dos diâmetros dos quatro tubos contidos no sistema absorvedor é de 133,604 mm, conforme a Fig. (3-7). Portanto, o melhor aproveitamento da energia refletida será atingido se a incidência da radiação se limitar a essa faixa.

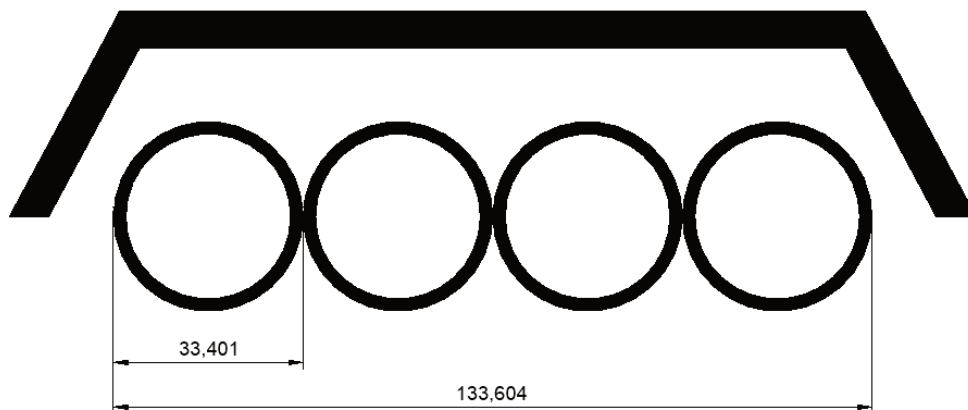


Figura 3-7 - Tubos do absorvedor e suas respectivas medidas.

3.1.1.3 Simulação da influência da diferença entre os dois métodos de rastreamento

Para estimar a possível influência que os desvios entre os dois métodos poderia provocar a ponto de haver uma possível perda de radiação e, conseqüentemente, potência do sistema, foi utilizado o software SolTrace. Este programa que possui ferramentas que possibilitam estimar, entre outras coisas, a área (zona focal) da radiação refletida no absorvedor através da criação de imagens. Desta forma, é possível analisar eventuais perdas, através da comparação entre a faixa de valores gerados na imagem.

3.1.1.3.1 Limite de desvio apresentado para a perda de radiação no absorvedor

O valor limite de desvio para manter a incidência da radiação dentro da largura útil do absorvedor (largura dos tubos) pode ser observado na Fig. (3-8) onde é estimado um erro de $0,2^\circ$. Neste caso, a largura é aceitável pois apresenta valores entre $-0,065$ m e $+0,065$ m, totalizando 130 mm, ligeiramente abaixo do limite estipulado (133,604 mm). A Fig. (3-9) representa a ilustração da radiação solar incidente no plano de abertura do absorvedor.

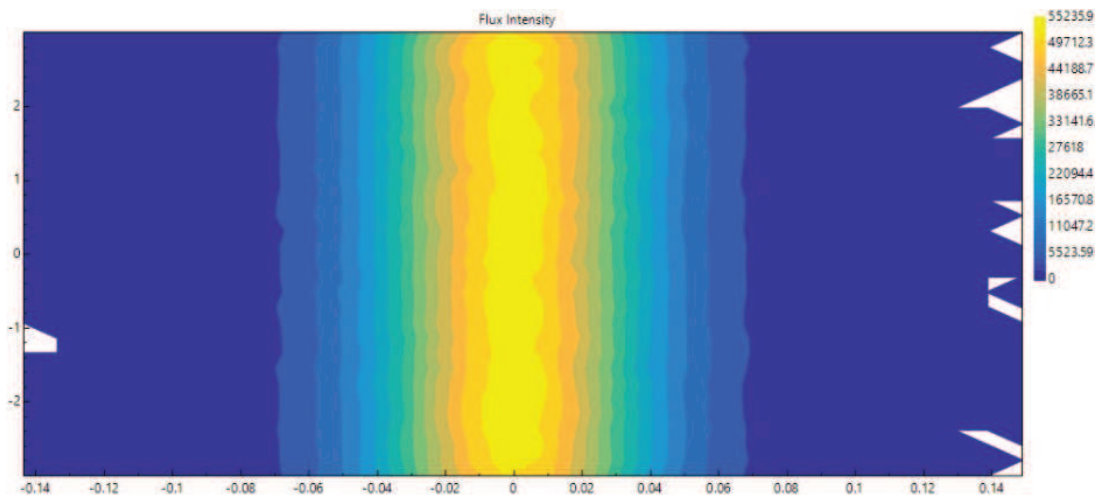


Figura 3-8 - Reflexão da radiação pelos espelhos no absorvedor, considerando um sistema com erro de seguimento de $0,2^\circ$ (diferença entre o ângulo de inclinação θ_n teórico e o real de 3,49065 mrad).

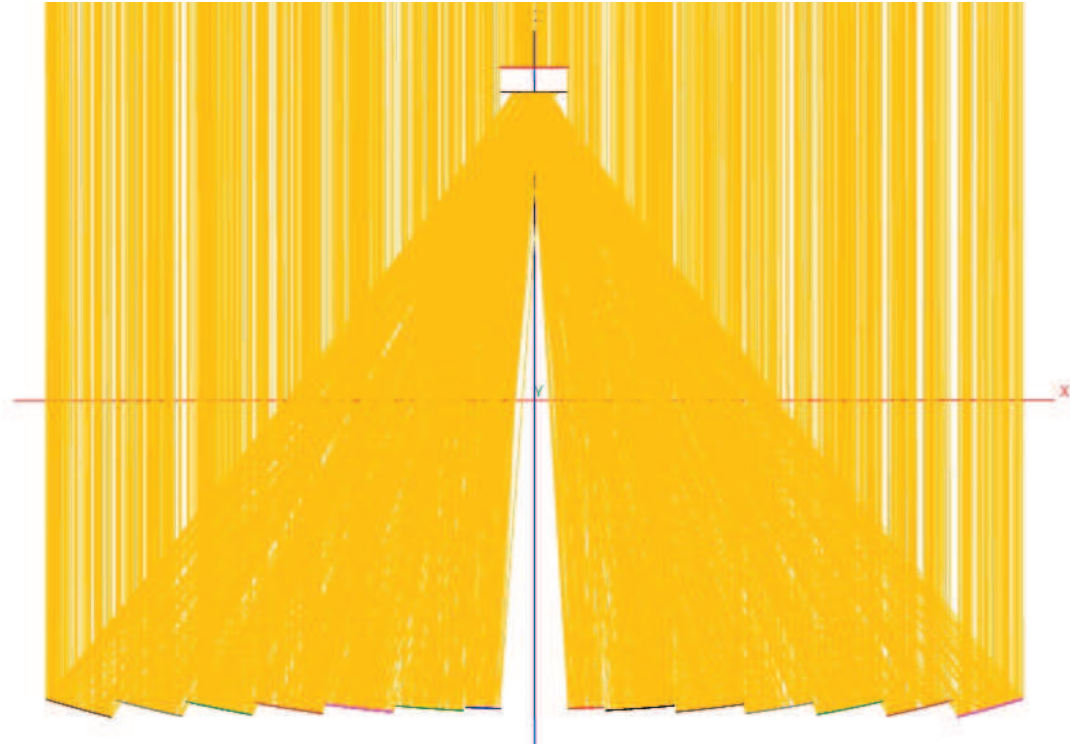


Figura 3-9 - Vista do sistema completo, com a radiação refletida pelos espelhos no absorvedor.

3.1.1.3.2 *Análise da simulação do primeiro método*

A Fig. (3-10) mostra especificamente a radiação concentrada no sistema absorvedor, com o valor de incerteza baseado no primeiro modelo analisado (Reda e Andreas, 2008). Neste caso, considerando as incertezas do ângulo θ_n apontadas por esse tipo de modelo ($0,0003^\circ$), bem abaixo do valor limite ($0,2^\circ$). É possível notar que a largura máxima da faixa de radiação representada pelo eixo “x” se encontra entre os valores de $-0,036$ e $+0,036$ m, totalizando o valor de largura máxima do feixe concentrado de $0,0072$ m (72 mm). Considerando que esta medida está abaixo da considerada como a referência, formada pelos quatro tubos (133,604 mm), mostrados na Fig. (3-7), é possível definir que não haverá perda de radiação refletida dos espelhos no absorvedor.

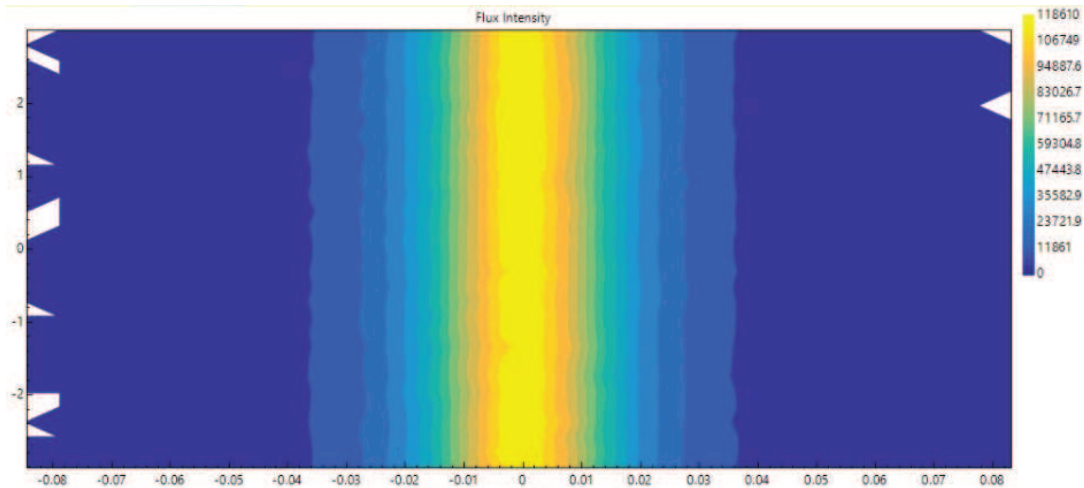


Figura 3-10 - Reflexão da radiação pelos espelhos no absorvedor, considerando um sistema com erro de seguimento de $0,0003^\circ$ (diferença entre o ângulo de inclinação θ_n teórico e o real de $0,0052359$ mrad).

Definido que o primeiro método não acarreta perda por radiação, é possível efetuar a análise da influência considerando o outro modelo de equacionamento, baseado em Duffie e Beckman (2013) e, desta forma, verificar a sua viabilidade, visto que é um método mais simples e portanto no caso de não haver perda por radiação, deve ser usado preferencialmente.

A Tab. (3-2) mostrou que havia alguns desvios entre os métodos com valores consideráveis, em que a maior diferença encontrada para o ângulo θ_n entre os métodos foi de $0,66^\circ$ às 18 h do dia 25 de outubro. A simulação deste desvio é observada na Fig. (3-11) onde a concentração da radiação fica entre as faixas de $0,14$ a $+0,14$ m (eixo “x”), totalizando $0,28$ m ou 280 mm, valor bem superior aos $133,604$ mm estipulados como limite superior na seção 3.1.1.2.

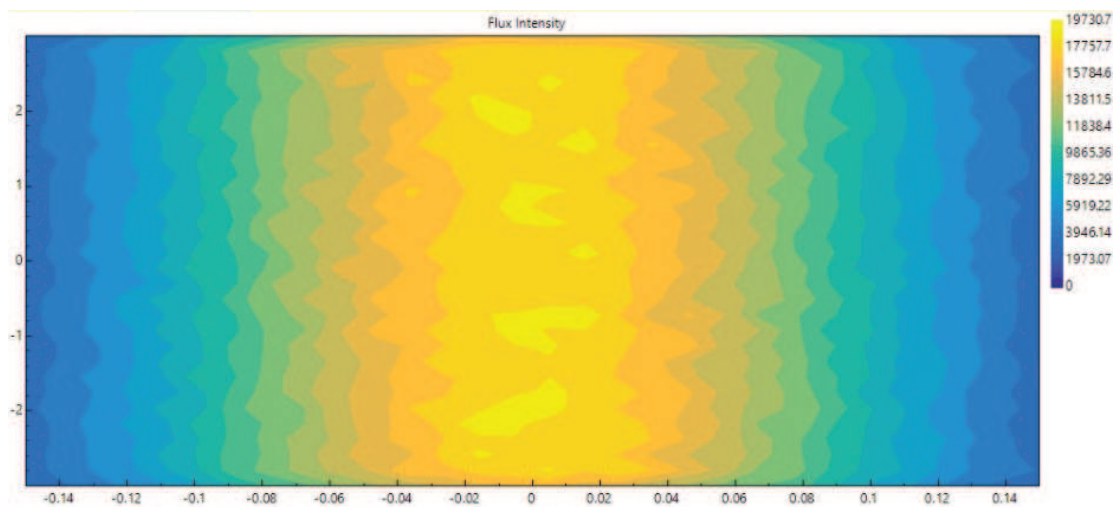


Figura 3-11 - Reflexão da radiação pelos espelhos no absorvedor, considerando um sistema com erro de seguimento de $0,66^\circ$ (diferença entre o ângulo de inclinação θ_n teórico e o real de $11,519173$ mrad).

Se for considerado o limite de erro apresentado na seção 3.1.2.3.1, em que o valor máximo permitido de desvio para ficar dentro dos limites do absorvedor e, conseqüentemente, eliminar as perdas por radiação é de $0,2^\circ$, é possível verificar que os valores excedidos neste caso, não são apenas no horário das 18 h, mas também as 16 h, ficando fora deste limite, pois apresentam valores entre $0,24$ e $0,25^\circ$ enquanto o valor encontrado as 14 h mostrou-se ainda maior ($1,45^\circ$).

Desta forma, é possível constatar que, de fato, haverá perda de radiação considerável no absorvedor, o que inviabiliza o uso deste segundo método, ficando portanto como opção mais adequada o método baseado em Reda e Andreas (2008) .

3.1.2 Variáveis Envolvidas

As variáveis envolvidas no sistema de controle podem ser separadas em três grupos:

- Variáveis geográficas: Neste caso, as variáveis envolvidas referem-se à latitude e longitude onde está situado o LFR. O local da instalação é o Campus São Leopoldo, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, localizada na cidade de São Leopoldo, Rio Grande do Sul, no Laboratório de Fontes Renováveis de Energia, conforme mostrado na Fig. (3-12). As coordenadas de latitude e de longitude são $-29^\circ47'38''$ e $-51^\circ08'56''$, respectivamente.

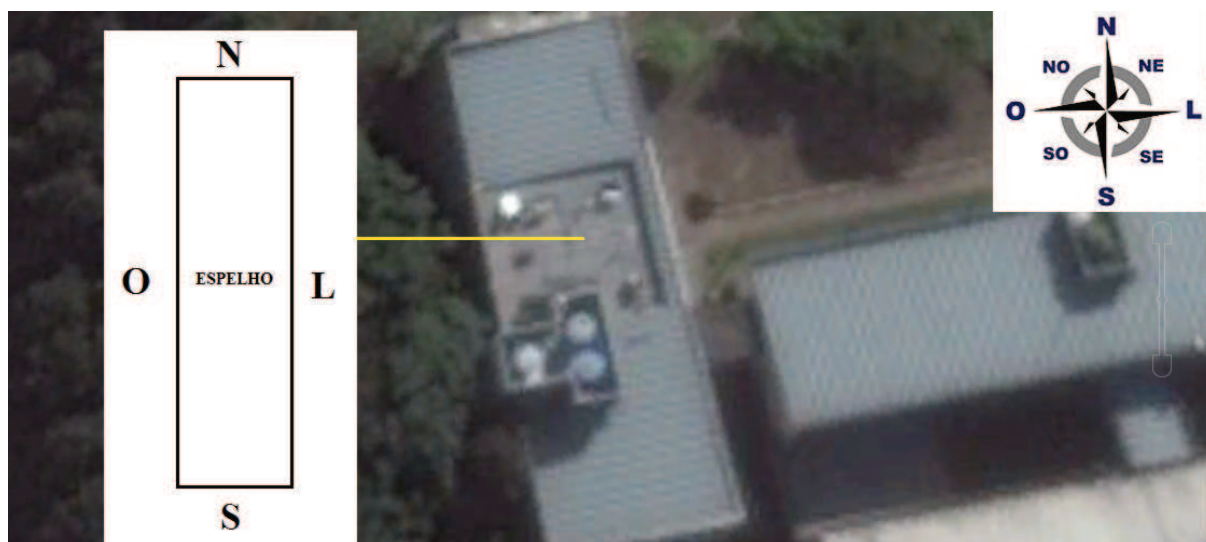


Figura 3-12 - Vista de satélite do terraço do prédio onde está o Laboratório de Fontes Renováveis de Energia.

-Variáveis temporais: Essas variáveis são fornecidas por um relógio de tempo real, que manterá o horário, o dia e o ano atualizados. As variáveis de tempo utilizadas como dados de entrada para o equacionamento e definição da posição solar para um determinado instante são: ano, mês, dia, hora, minuto e segundo.

Para tornar o cálculo mais preciso também é utilizado um fator de compensação de fuso horário, considerando o tempo universal coordenado (*Universal Time Coordinated*) ou UTC. No caso de Brasília, tempo padrão a ser utilizado é UTC-3, ou seja, três horas atrasado em relação ao horário do meridiano de Greenwich. Esse valor é fixo e dispensa eventuais mudanças, como a implantação do horário de verão.

Variáveis estruturais: Estas variáveis levam em conta os aspectos geométricos da estrutura do refletor Fresnel linear, como altura, H , entre o plano do eixo dos espelhos até o absorvedor e a distância, Q_n , dos espelhos em relação ao ponto de referência (centro do absorvedor), que são as duas principais variáveis a serem consideradas em se tratando de aspectos construtivos. A Fig. (3-13) mostra a vista lateral com a respectiva representação de um espelho e o absorvedor.

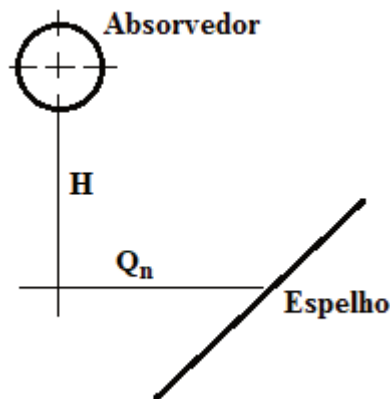


Figura 3-13 - Vista lateral mostrando o exemplo de posicionamento do espelho em relação ao absorvedor, considerando H como altura do centro do espelho até o absorvedor e Q_n como a distância formando um linha horizontal do espelho até o absorvedor.

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

O movimento dos espelhos foi efetuado por um motor de passo. A atualização do sistema foi baseada em um relógio de tempo real (RTC). Um display está disponível para informar as principais variáveis envolvidas (horário, dia, ângulo). Para o controle do motor foi utilizado um driver de potência, equipamento que tem como objetivo, através da informação fornecida pelo microcontrolador, fornecer os pulsos de alimentação ao motor, fazendo com que esse se posicione

corretamente, bem como mantenha o torque adequado durante o funcionamento. O motor de passo, por sua vez, converte os pulsos do driver em posição angular através de um movimento giratório. Ele pode posicionar o motor em qualquer ponto dentro dos 360°, com resolução que pode ser configurada de acordo com o driver de potência, podendo ser configurado em intervalos de 0,036° até 1,8°. O sistema possui um sensor de inclinação que indica a posição final no espelho, possibilitando a correção de eventuais falhas entre a saída do Arduino e o eixo dos espelhos.

O algoritmo para atualização do ângulo θ_n pode ser dividido em três etapas, como apresentado na Fig. (3-14), cada uma com seu objetivo bem definido:

-Etapa do RTC: mantém as variáveis de tempo constantemente atualizadas (dia, hora, minuto e segundo);

-Etapa da calculadora solar: Esta etapa consiste em obter os ângulos de azimuth e de zênite. O cálculo do posicionamento solar foi desenvolvido em linguagem de programação C, adaptando o algoritmo solar de Reda e Andreas (2008). A programação é descrita no Apêndice B, onde também é mostrada a adaptação das equações que envolvem os dados fornecidos pelo RTC.

-Etapa da equação de reflexão solar: Através dos dados de posição solar atualizados e baseados em valores construtivos da posição da relação espelhos-absorvedor, direcionando os espelhos de forma a concentrar o máximo possível da radiação no absorvedor.

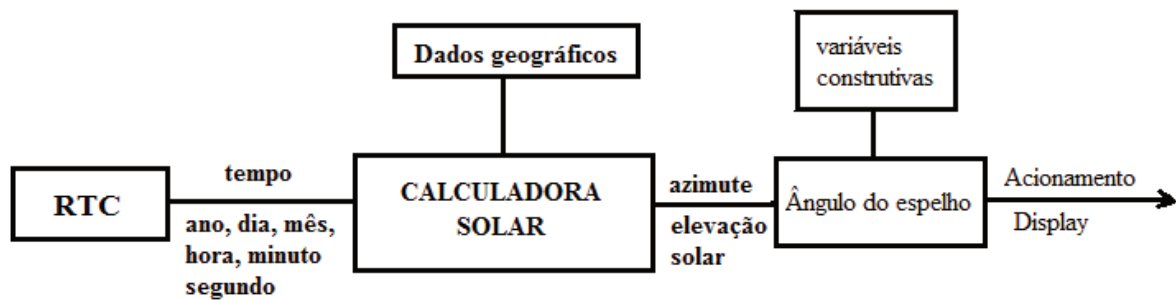


Figura 3-14 - Demonstração resumida da sequência lógica utilizada na programação.

3.2.1 Método usado para a movimentação dos espelhos

O método de movimentação possui o seu movimento em apenas um eixo. Esse movimento de giro é realizado através da conexão entre um motor de passo e os espelhos. Esse tipo de acionamento é viável apenas quando a variação angular dos espelhos ao longo do dia for constante, garantindo assim precisão do sistema. Para justificar tal método, é necessário que os valores de variação angular entre os espelhos se mantenham constantes. O gráfico mostrado na Fig.(3-15) mostra que praticamente não houve variação entre os espelhos durante o dia 25 de Outubro de 2018.

Resultados semelhantes podem ser observados em outras datas, mostradas nas Tab. (A-12), Tab. (A-16), Tab. (A-20) e Tab. (A-21). A variação máxima calculada verificada em cada horário foi de $0,01^\circ$.

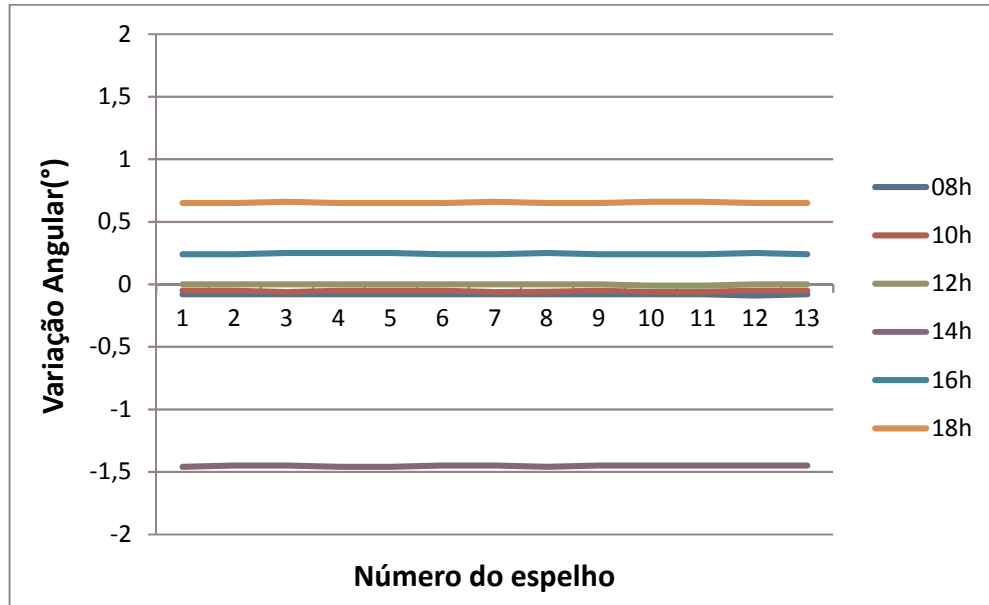
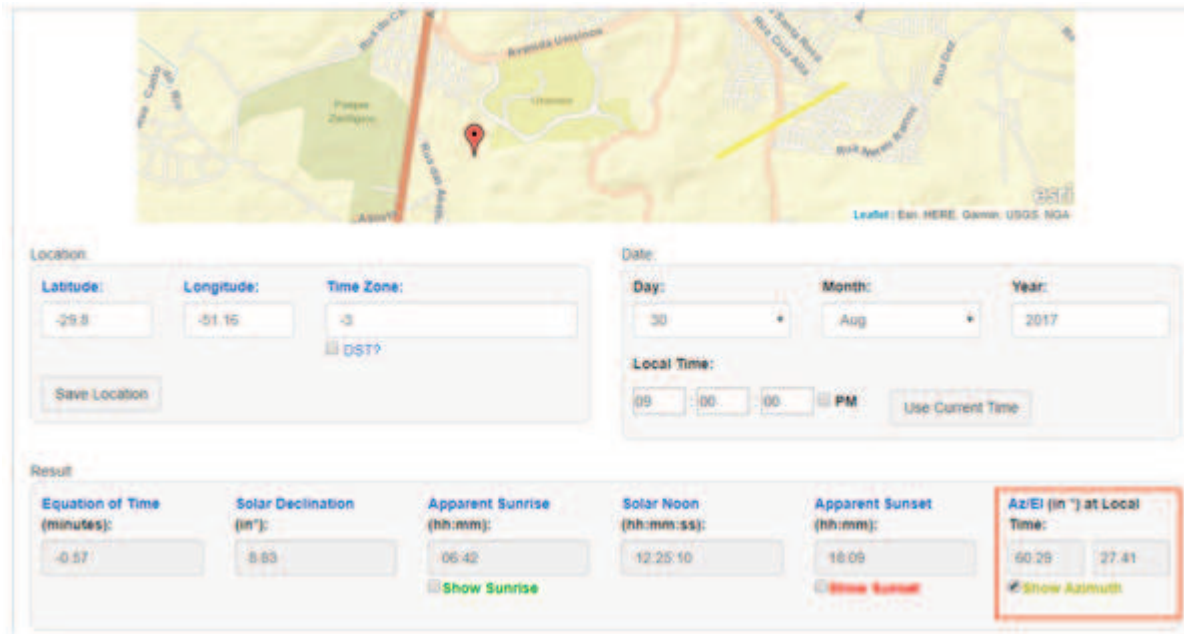


Figura- 3-15 - variação angular dos espelhos para 5 horários calculados.

3.2.2 Conferência dos Principais Valores de Saída

A conferência dos valores calculados foi feita através do “NOAA Solar Calculator” (Administração Oceânica e Atmosférica Nacional), órgão do departamento Governamental dos Estados Unidos da América. A Fig. (3-16), obtida do próprio site, mostra a localização da Unisinos, onde será instalado o sistema bem como as informações de data e de hora da consulta no dia 30 de agosto de 2017 e horário 9 h. Os valores obtidos para os ângulos de azimuth e de elevação solar aparecem destacados no canto direito e são respectivamente $60^\circ 29'$ e $27^\circ 41'$. A Fig. (3-17) mostra os dados de data, hora e os respectivos ângulos na disposição do display do protótipo.



The screenshot shows the NOAA Solar Calculator interface. At the top, a map displays the location of Unisinos, Brazil, marked with a red pin. Below the map, the 'Location' section includes input fields for Latitude (-29.8), Longitude (-51.15), and Time Zone (-3), along with a 'Save Location' button. The 'Date' section shows the date as 30 Aug 2017 and the local time as 09:00:00 PM. The 'Result' section contains a table of solar data:

Equation of Time (minutes):	Solar Declination (in°):	Apparent Sunrise (hh:mm):	Solar Noon (hh:mm:ss):	Apparent Sunset (hh:mm):	Az/EI (in °) at Local Time:
-0.57	8.83	06:42	12:25:10	18:09	60.29 27.41

The 'Az/EI' column is highlighted with a red box, indicating the azimuth and elevation angles.

Figura 3-16 – Localização da Unisinos no mapa do site, com destaque no canto direito para as informação de ângulo de azimuth e de elevação solar.

Fonte: NOAA Solar Calculator.



Figura 3-17 - Disposição dos dados em um display (LCD 16 x 2) com as respectivas informações de data hora , ângulo de azimuth e de elevação solar.

3.2.3 Diagrama elétrico e ligação dos componentes

A Fig. (3-18) mostra o diagrama elétrico do sistema de automação. Neste circuito são mostrados seus principais componentes com a respectiva ligação.

O LCD é ligado diretamente ao Arduino com a função básica de visualização dos valores de data, horário, ângulo calculado e ângulo medido. Um resistor ajustável de 10 k Ω tem a função de ajustar a intensidade do seu brilho. A alimentação do display é de 5 V, fornecida pelo próprio módulo Arduino. A alimentação do módulo Arduino por sua vez é feita por uma fonte independente de 12 V. A atualização de data e horário é realizada pelo módulo D1 (DS1307), específico para o Arduino através das saídas SCA e SQL.

A leitura do sensor de inclinação é processada em sinal de saída do tipo SSI (*serial síncrona interface*). Este tipo de sinal não pode ser interpretado diretamente pelo módulo Arduino, portanto o mesmo é convertido para um sinal analógico de 0 a 5 V através do conversor SSI/Analógico representado como “C1”. O sinal analógico é enviado para o do Arduino através dos pinos A2 e A3. A alimentação, tanto sensor de inclinação quanto do conversor, é feita através da fonte de 24 V (em corrente contínua). A mesma fonte alimenta o driver de potência do motor, mencionado na Fig. (3-18) apenas como “DRIVER”. Entre ambos estão os interruptores limitadores de curso “S1” e “S2”, ambos ligados em série. Eles possuem a função de interromper a alimentação do driver (e consequentemente do motor) em caso dos espelhos se aproximarem da estrutura, colocando em risco a sua integridade. O mesmo driver é responsável pelo comando de movimentação do motor através de quatro terminais de saída (A+, A-, B+, B-). A entrada de pulsos para o posicionamento do eixo do motor no driver se dá através dos terminais “STEP+”, da forma explicada na seção 3.2.4. O terminal “STEP-” fica sempre alimentado com o terminal GND (terra). Os terminais “DIR+” e “DIR-” possuem a função de mudar o sentido de giro do motor. Isso se dá através da mudança do sinal enviado ao “DIR +” onde aplicando um sinal positivo faz com que o motor gire no sentido horário, enquanto aplicando sinal GND o seu movimento é invertido. O terminal “DIR-” por sua vez é alimentado somente com o sinal GND. O sensor de temperatura tem como objetivo monitorar a temperatura do fluido de transferência de calor e tem seus terminais conectados nas entradas “A5” e “A6” do módulo Arduino Mega. Esse módulo possui a função de centralizar o processamento e tomar as decisões desfocando os espelhos se a temperatura exceder 310 °C (valor máximo recomendado pelo fabricante do fluido de transferência de calor), interpretando os sinais dos componentes de entrada (sensores de inclinação, temperatura e RTC) e enviando os sinais adequados aos componentes de saída (motor e display).

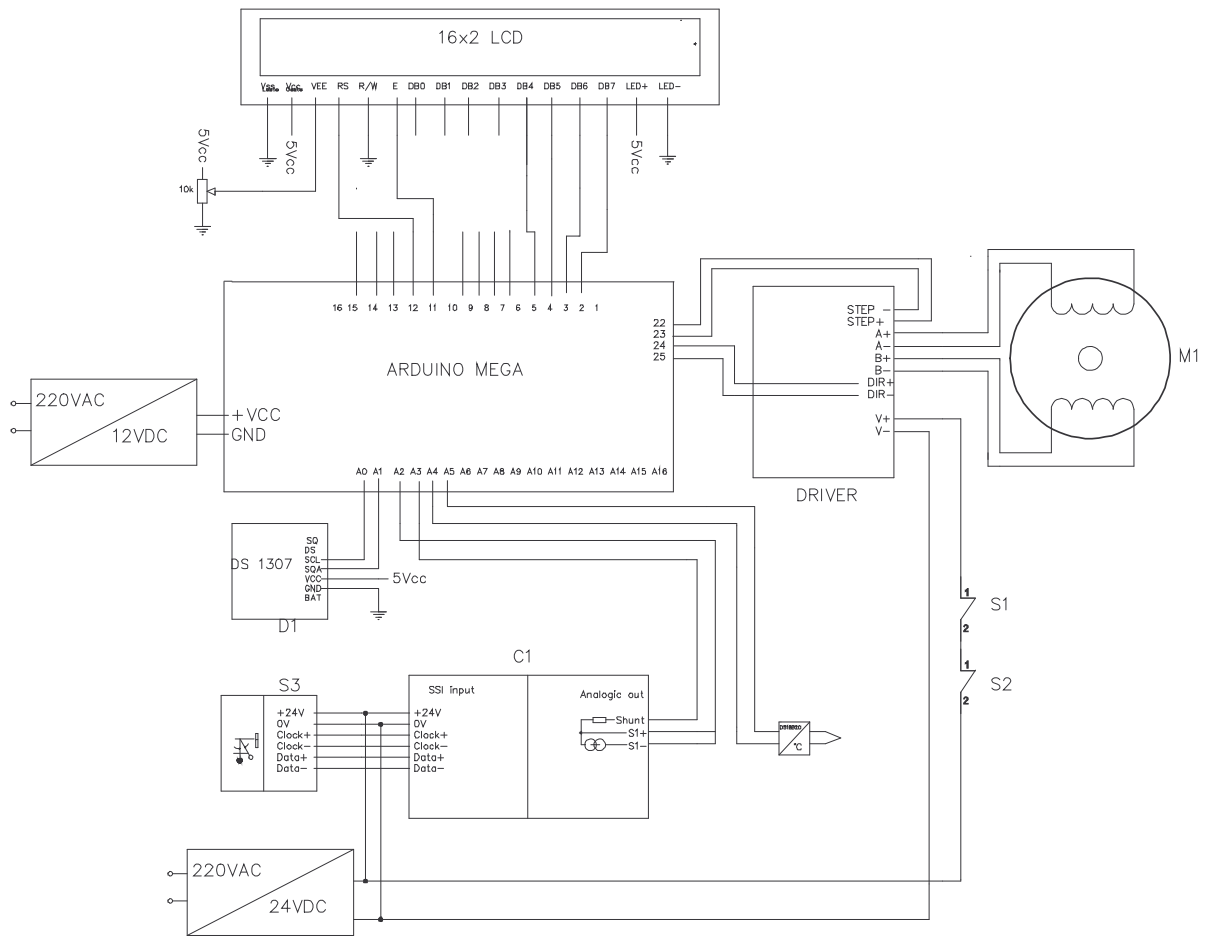


Figura 3-18 - Diagrama elétrico com a ligação dos componentes.

3.2.4 Comunicação de Informações Entre a Parte lógica e o Driver do Motor

O cálculo do ângulo final, que é conhecido como o ângulo de inclinação do espelho, θ_i , é mostrado na forma decimal. Este valor é exposto no display de cristal líquido para informação e controle do usuário. No entanto, é necessário fornecer esse valor de forma a ser interpretada pelo driver de potência do motor, para que finalmente se obtenha o ângulo final de posicionamento do motor.

A maneira de efetuar isso depende principalmente de dois fatores. O primeiro é a relação de transmissão entre o motor e o espelho, dado obtido no seletor do número de pulsos por volta selecionados no driver do motor de passo. O segundo fator é a relação de transmissão entre o motor e o espelho. Há duas alternativas: utilizar o acoplamento direto ou utilizar um sistema de redução 5:1, que foi adquirido junto com o motor, e que será utilizado caso seja necessário aumentar o torque disponível no motor. O número de pulsos por volta, selecionado no driver de acionamento do motor,

está configurado para trabalhar com 2.000 passos por volta (resolução de $0,18^\circ$), mas futuramente é possível alterá-la para 5.000 passos por volta (resolução de $0,072^\circ$). Como uma volta possui 360° , a equação utilizada para o cálculo da sequência de pulsos do driver é dada pela (Eq. 3.1):

$$R = \frac{N}{360} \theta_n \quad (3.1)$$

onde R é o número de pulsos enviados do módulo Arduino para o driver, N é o número de pulsos programados nos seletores do driver do motor e θ_n é o ângulo de inclinação do espelho, já calculado no Arduino na etapa anterior. No caso da utilização do redutor, esse valor deve ser multiplicado por 5.

A sequência de pulsos pode ser representada graficamente na Fig. (3-19). Trata-se basicamente de um sinal eletrônico de onda quadrada. Este pulso representa um sinal digital básico, onde há alternância entre o sinal ligado (+5 V) e o desligado (0 V). Essa mudança ocorre em questão de 1 milissegundo e pode ser ajustada na hora da programação para obter uma melhor performance.

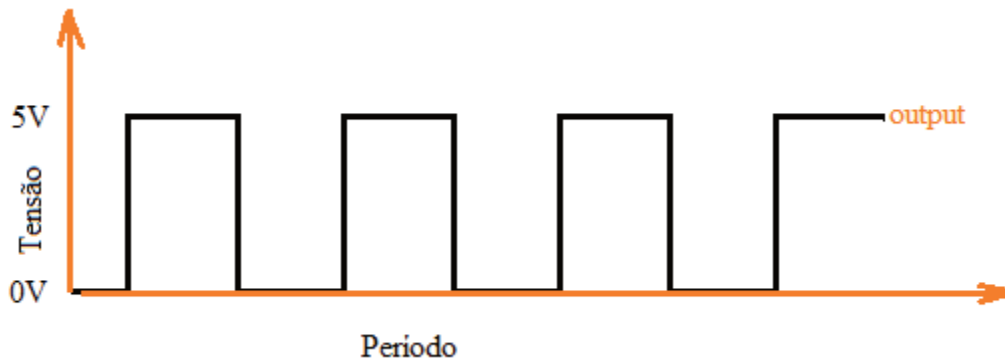


Figura 3-19 - Forma gráfica da onda quadrada representando um intervalo de sequência de pulsos.

3.3 PASSOS PARA UTILIZAÇÃO DO SISTEMA MICROCONTROLADO

As informações recebidas pelo RTC e pelo sensor de posicionamento dos espelhos, em conjunto com as informações de saída enviadas ao driver de potência do motor e ao LCD, obedecem à sequência mostrada no diagrama de blocos da Fig. (3-20).

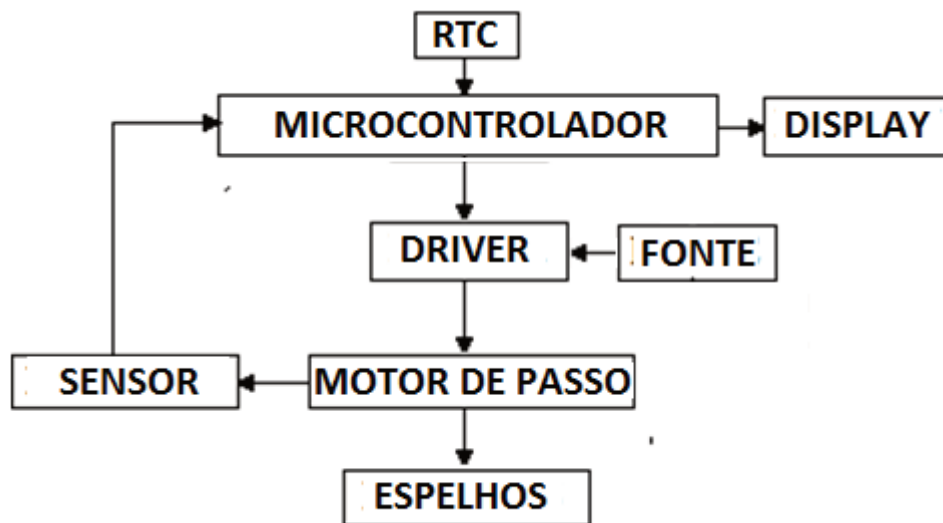


Figura 3-20 - Diagrama de blocos dos componentes responsáveis pelo acionamento dos espelhos.

3.3.1 Microcontroladores

O microcontrolador utilizado faz parte de uma placa eletrônica modelo Arduíno mostrada na Fig. (3-21). Cavalcante (2016), salienta que o Arduíno é uma boa opção para ser utilizado por contar com uma plataforma de software gratuita além de linguagem de programação amigável. Outro aspecto fundamental é o fato de haver um número muito grande de tutoriais na internet, facilitando a troca de informações. Seu hardware é composto basicamente por três conjuntos de entradas e saídas organizadas para trabalharem com sinal analógico e digital. Inicialmente o Modelo de Placa do Arduíno escolhida foi o modelo “Uno”, modelo esse mais simples com custo reduzido. Porém, à medida que foram realizadas implementações no programa, sobretudo, quando foi optado pelo modelo de equacionamento mais complexo (seção 3.1.1), a memória rom deste modelo de Arduíno se mostrou insuficiente. O processamento final exigia uma capacidade de pelo menos 42 kb, acima do disponível do Arduíno Uno (32 kb). Optou-se então pela escolha do Arduíno “Mega” com memória rom de 256 kb, bem acima do exigido no programa.

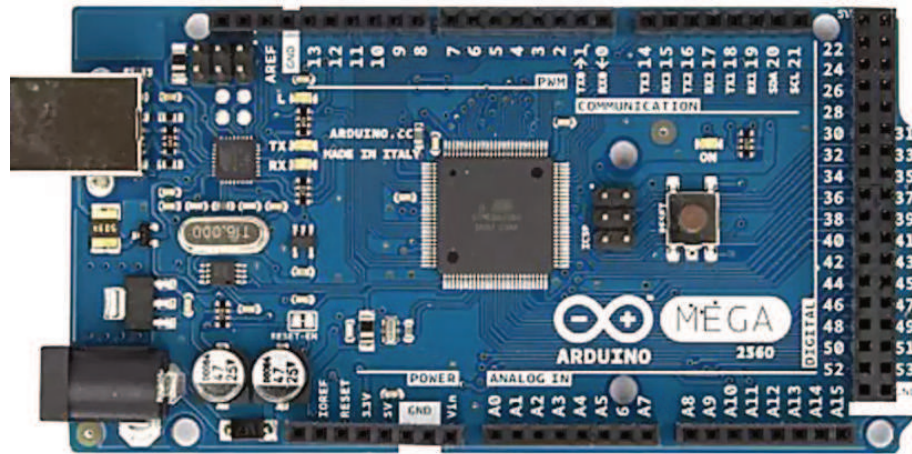


Figura 3-21 - Detalhe de um módulo Arduino modelo Mega.

3.3.2 Relógio de Tempo Real

Relógio de tempo real (RTC ou *real-time clock*) é um circuito integrado que fornece informações de horário para um circuito mestre, como por exemplo, um microcontrolador ou um microprocessador. Normalmente, a base de tempo de referência é fornecida por um sinal de oscilador cuja frequência é determinada por um cristal de quartzo, o que garante precisão ao sistema. Mesmo que haja o desligamento da energia fornecida a este dispositivo, o RTC se mantém em funcionamento através de uma bateria externa. Neste trabalho, o RTC tem duas funções principais: contar o tempo de rotina de programação do controlador e ser responsável pelo incremento de horário e atualizar o calendário do programa, para poder obter de forma satisfatória o aproveitamento dos raios solares conforme a posição solar.

3.3.3 Central de Controle

Para proteção e facilidade de manuseio, os equipamentos utilizados na lógica de controle (Arduino, RTC, display) foram montados em um invólucro termoplástico, dispostos conforme mostrado na Fig. (3-22). O display inicialmente mostra a data e horário, além dos ângulos de elevação solar e de azimute. Com a utilização do sensor de inclinação, a visualização destes dois ângulos foi substituída pelo ângulo de inclinação dos espelhos, θ_n calculado, ou seja, o valor enviado ao driver de potência e pelo valor medido desse ângulo, através do sensor de inclinação, facilitando dessa forma a conferência do funcionamento e da precisão do rastreador.



Figura 3-22 - Vista frontal da central de controle.

Na lateral da central de controle, apresentada na Fig. (3-23), é mostrada a entrada de alimentação de 12 Vcc que garantirá o funcionamento do sistema de controle. É importante lembrar que, mesmo em caso de queda de energia, o horário permanecerá atualizado devido à uma bateria presente no RTC. A porta de programação do rastreador possibilita ao usuário o acesso fácil ao programa do Arduino, podendo efetuar correções ou atualizações da programação. É mostrado também na Fig. (3-23) o local da abertura para a passagem dos cabos, onde estão os cabos de envio de sinais de saída para o driver e de entrada do sensor de inclinação.

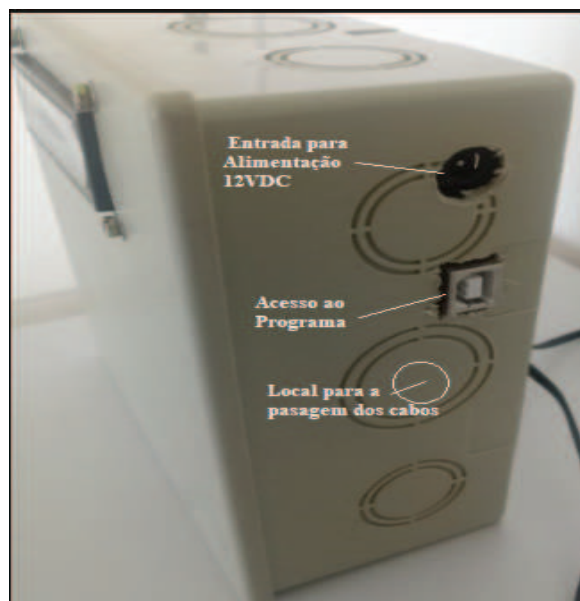


Figura 3-23 - Vista lateral da caixa de controle.

3.3.4 Driver de Potência

O driver de potência do motor tem como função acionar o motor de passo que movimentará os espelhos. Funciona basicamente recebendo uma informação do micro- controlador e convertendo-a em uma sequência de pulsos elétricos. Cada pulso é responsável por fazer o motor movimentar um determinado ângulo. É possível ajustar a resolução através da configuração de um conjunto de chaves seletoras, Fig. (3-24), dispostas na lateral do equipamento de acordo com o número de passos por volta, podendo ser 200 passos por volta (resolução de $1,8^\circ$), 400 passos por volta (resolução de $0,9^\circ$), 2.000 passos por volta (resolução de $0,18^\circ$), 5.000 passos por volta (resolução de $0,072^\circ$), 12.800 passos por volta (resolução de $0,028125^\circ$), 20.000 passos por volta (resolução de $0,018^\circ$) a configuração adotada para esse trabalho foi de 2.000 passos por volta (resolução de $0,18^\circ$).

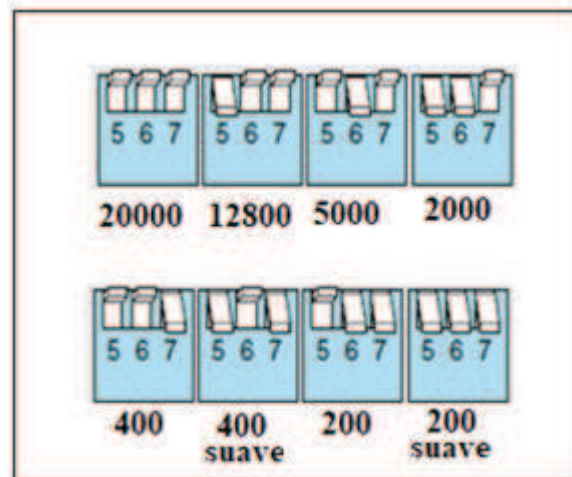


Figura 3-24 - Configuração das chaves seletoras conforme a opção de resolução.

3.3.5 Fonte de Alimentação

Sua função principal é fornecer a energia elétrica para o driver através da conversão da tensão alternada da rede (220 V) para a tensão contínua compatível com o sistema eletrônico e o motor de passo (24 V). O modelo da fonte de alimentação possui uma capacidade de fornecimento de corrente elétrica de até 10 A, suficiente para atender toda a demanda solicitada.

3.3.6 Motor de Passo

Para a movimentação de todas as 14 fileiras de espelhos foi utilizado apenas um motor de passo. Seu acoplamento foi efetuado através de um sistema redutor. O motor de passo é um motor

elétrico utilizado quando se deseja o posicionamento de um determinado mecanismo de forma precisa. Seu método de trabalho consiste em girar o seu eixo de acordo com o número de pulsos elétricos recebidos. O motor utilizado neste trabalho é o modelo NEMA 23 (HT23-402.8), com 200 pulsos ($1,8^\circ$ / pulso), podendo ser ampliado para até 20.000 pulsos, de acordo com o driver de potência utilizado. O torque disponível no eixo do motor é de 13 Nm e a corrente elétrica nominal é de 3 A. O motor de passo utilizado é mostrado na Fig. (3-25) e foi adquirido em conjunto com um sistema de redução de 5:1, próprio para esse modelo de motor, utilizado caso seja comprovada a insuficiência de torque durante os testes práticos.



Figura 3-25- Motor de passo utilizado.

3.4 SISTEMA DE SEGURANÇA LIMITADOR DE POSICIONAMENTO DOS ESPELHOS

Para limitar a faixa de movimentação dos espelhos foi confeccionada uma base com dois interruptores. Sua função é interromper o fornecimento de energia da fonte de alimentação e, conseqüentemente, o motor responsável pela movimentação dos espelhos, fazendo com que pare imediatamente, interrompendo todos os movimentos. O sistema de interrupção é totalmente independente da programação do módulo Arduino garantindo assim mais confiabilidade ao sistema. Desta forma, havendo a possibilidade do espelho extrapolar o seu curso habitual e bater na base da estrutura (o que provocaria a sua quebra) o interruptor atua, interrompendo o movimento imediatamente. Essa situação só ocorrerá na hipótese de uma falha de leitura do sensor de inclinação ou em uma eventual falha de cálculo do Arduino, o que deve ser considerando como um hipótese possível, mas muito difícil de ocorrer. A Fig. (3-26) mostra o conjunto já montado, inclusive com a parte elétrica concluída.

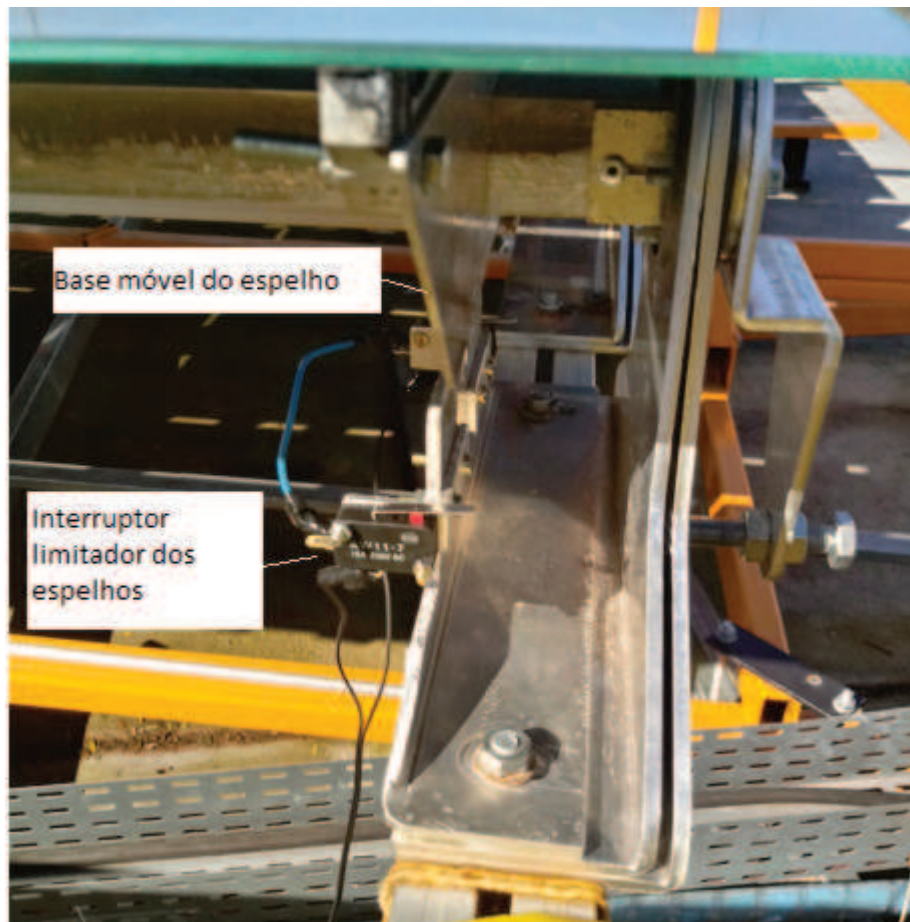


Figura 3-26 - Sistema limitador do curso dos espelhos.

3.5 INTEGRAÇÃO E TESTE DOS COMPONENTES

Para a integração e testes dos componentes foi utilizada uma bancada experimental, conforme a Fig. (3-27). Foram conectados os componentes de controle (módulo Arduino e RTC) e os componentes de potência (fonte, driver e motor de passo). Essa montagem também permitiu verificar a compatibilidade entre os componentes do projeto antes da montagem final.

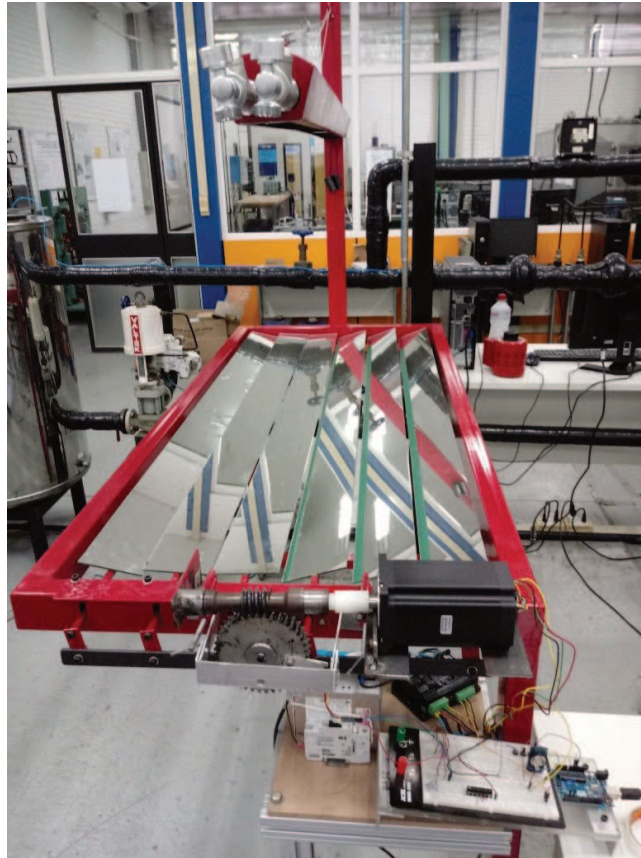


Figura 3-27- Bancada de testes utilizada na integração dos componentes de controle e potência.

3.6 MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DA POSIÇÃO DOS ESPELHOS

Alguns dispositivos podem ser utilizados como medidores de rotação ou medidores angulares para monitorar a posição do eixo onde ficarão os espelhos. Embora o equacionamento elaborado no módulo Arduino seja preparado para se obter o menor desvio possível da posição solar ($0,0003^\circ$), o sistema como um todo não está isento de eventuais erros que possam ocorrer nas etapas posteriores, como nos componentes de potência (driver de potência e motor de passo), além de eventuais folgas na parte mecânica (estrutura e sistema de transmissão entre o motor de passo e o eixo onde é fixado o espelho). Com o intuito de efetuar a leitura final do ângulo θ_n e também corrigir eventuais desvios dos elementos citados entre a saída do módulo Arduino e o posicionamento final dos espelhos, será utilizado um sensor de inclinação absoluto, modelo Kinax N702 do fabricante Camile Bauer, mostrado na Fig. (3-28), que apresenta uma precisão de $\pm 0,2^\circ$. Os terminais responsáveis pelo sinal de saída do sensor de inclinação (sinal analógico, de 4 a 20 mA) serão conectados ao módulo Arduino para que possa efetuar a sua leitura. Uma rotina de programação irá comparar o valor calculado inicialmente com o valor medido pelo sensor e se houver diferença entre

ambos, efetuar a correção através do envio de pulsos ao driver do motor de passo, até que o sensor indique que o valor lido seja igual ao calculado.



Figura 3-28 - Sensor de inclinação.

O sensor de inclinação utilizado possui a saída de controle do tipo SSI (*Synchronous Serial Interface*). Para o funcionamento deste tipo de sinal é necessária uma sequência específica de instruções, o que deixa a interpretação dos valores muito complexa. Para efetuar sua leitura, devem-se utilizar equipamentos dedicados que sejam fabricados com esse padrão de leitura ou deve ser criada uma rotina específica para tal. Para facilitar a leitura e a aquisição de dados do sensor de inclinação, será utilizado o conversor mostrado na Fig. (3.29), cuja função será transformar o sinal de saída do tipo SSI em um sinal analógico de 4 a 20 mA. Deste modo, a faixa de variação de corrente é que deverá ser interpretada em um valor correspondente ao ângulo medido. Adaptando esse sinal no módulo Arduino é possível determinar qual o ângulo medido e, se necessário, efetuar a sua correção.



Figura 3-29- Conversor SSI-analógico.

Após as medições mostradas na Tab. (4-2), o sensor foi separado da cantoneira e novamente calibrado para a sua fixação definitiva na parte inferior do espelho que fica mais próximo ao motor-reductor responsável pela movimentação dos espelhos (Espelho 1). A Fig. (3-30) mostra o local de fixação do sensor.

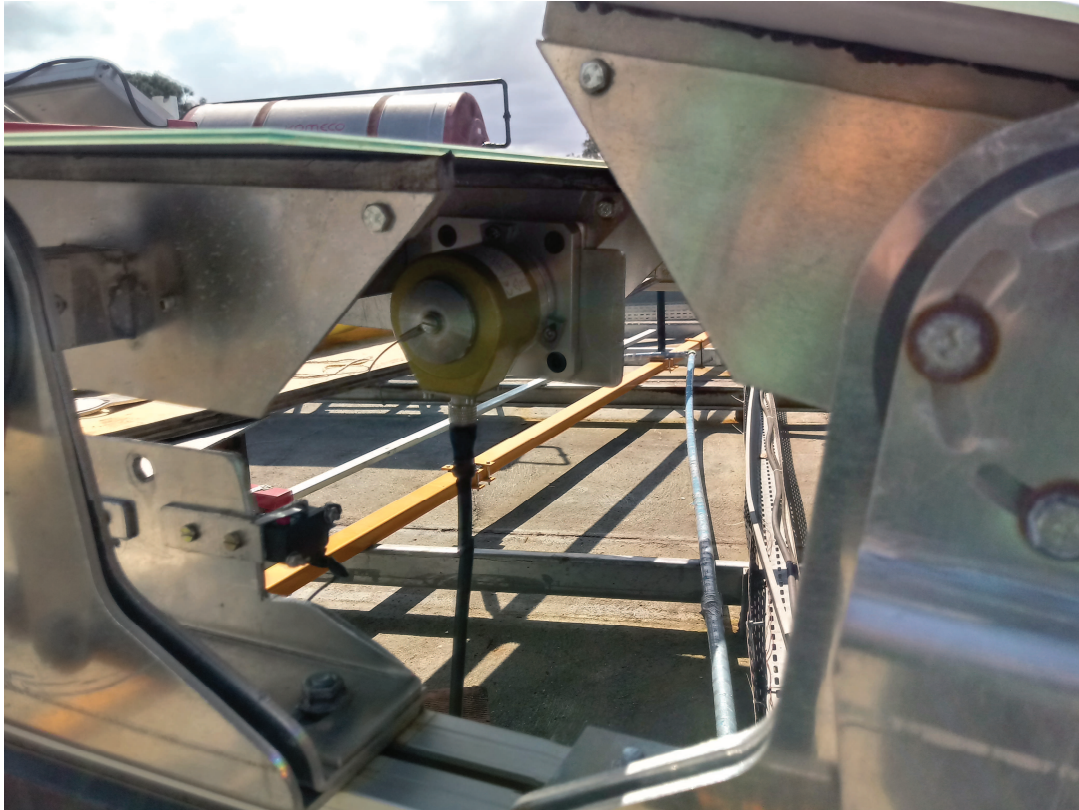


Figura 3-30 - Local de fixação do sensor de inclinação.

A leitura do sensor é feita pelo módulo Arduino. Para isso foi elaborado o envio do sinal do sensor para o conversor e, posteriormente, efetuada a leitura também no Arduino, através de sua entrada analógica. A configuração do conversor possibilitou definir a faixa de atuação do sinal de saída analógico do sensor de 0 a 10 V, com resolução de 5,5 mV. Como a faixa de variação máxima dos espelhos será inferior a 180° , a variação de tensão também será inferior a sua metade (5 V). A entrada de sinal analógico do módulo Arduino permite um sinal máximo de entrada de 5,7 V, portanto acima do valor de intervalo de trabalho (5 V). Mesmo assim, para segurança dos componentes foi colocado na entrada analógica um diodo Zener com tensão reversa de 5,1 V, garantindo que esse valor nunca seja ultrapassado, mesmo se houver uma falha no conjunto sensor/conversor.

3.7 CONTROLE DA TEMPERATURA MÁXIMA DO FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O fluido de transferência de calor utilizado é o Paratherm HE (óleo mineral hidro tratado). Nesse tipo de fluido a temperatura máxima de operação recomendada pelo fabricante é de 310 °C. Em dias onde houver uma alta incidência de radiação solar, essa temperatura pode ser superada em alguns pontos da instalação. Com o intuito de manter o fluido trabalhando dentro da sua faixa de temperatura recomendada e garantir que o mesmo mantenha as suas propriedades, foi instalado na saída do sistema absorvedor um sensor de temperatura do tipo termopar. Komanduri e Hou (2001) citam como vantagens do termopar a simplicidade de construção, facilidade de medição remota, simplicidade de operação e do processamento de sinal, além de baixo custo. A escolha deste tipo de sensor, além de considerar essas vantagens, também leva em conta o fato da temperatura que se deseja medir ficar dentro da faixa de medição para temperatura do termopar tipo K, mostrado na Tab. (3-3).

Tabela 3-3 - Dados sobre o termopar tipo K.

Letra padrão	Nome popular	Material (código de cores)- (material positivo aparece primeiro)	Faixa de temperatura típica	Coefficiente Seebeck a 100 °C, $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
K	Cromo-alumínio	Liga de níquel-cromo (amarelo) x liga de níquel- alumínio (vermelho)	-270 à 1372 °C	41,4

Fonte: Adaptado de Komanduri e Hou (2001).

4 RESULTADOS

4.1 MEDIÇÃO PRELIMINAR DO ÂNGULO DOS ESPELHOS

Para a medição de inclinação dos espelhos foi utilizado o sensor de inclinação e o seu respectivo conversor (ambos já vistos na seção 3.7). Devido ao fato de os equipamentos serem importados, demorou muito tempo para que os mesmos estivessem disponíveis para uso. Dessa forma foi realizada uma medição preliminar do ângulo de cada espelho de maneira manual, com equipamentos disponibilizados pelo Laboratório de Metrologia da Unisinos. Nesta medição, cada espelho foi posicionado de forma que refletisse a radiação solar exatamente no centro do absorvedor. Após encontrar a posição adequada, foi efetuada a medição individual do ângulo de cada espelho. Os equipamentos utilizados foram: um esquadro de 90° e um goniômetro da marca Mitutoyo de 0 a 360°, com incerteza de 5' de grau, mostrados na Fig. (4-1).



Figura 4-1 - Instrumentos usados para a verificação do ângulo de inclinação dos espelhos.

Para efetuar a medição da inclinação dos espelhos de forma preliminar foi utilizada, como apoio, a base da estrutura que, junto com um esquadro possibilitou a medição angular. As medições foram feitas durante vários períodos em todos os espelhos, conforme mostrado na Fig. (4-2).



Figura 4-2 - Medição do ângulo de inclinação de cada espelho.

A Tab. (4-1) apresenta os valores dos ângulos de inclinação medidos no dia 16 de fevereiro de 2018, as 15 h. Nesse instante, o valor do ângulo de azimuth era de $141,46^\circ$ e o ângulo de elevação solar obtido foi $64,12^\circ$. O número referente a cada espelho foi considerado no sentido oeste para leste (o espelho número 1 é mais a oeste e o número 14 mais a leste).

Tabela 4-1- Amostra de valores medidos em 16 de fevereiro de 2018, as 15 h através do goniômetro.

Número da fileira do espelho	Ângulo medido de inclinação do espelho, θ_n [°]	Ângulo teórico de inclinação do espelho, θ_n [°]	Desvio encontrado, [°]
1	-8,05	-8,58	0,53
2	-5,95	-6,44	0,49
3	-3,85	-4,10	0,25
4	-1,93	-1,57	0,36
5	1,56	1,14	0,42
6	4,24	3,99	0,25
7	7,4	6,92	0,48
8	9,45	9,89	0,44
9	12,63	12,82	0,19
10	15,25	15,67	0,42
11	17,95	18,38	0,43
12	20,45	20,91	0,46
13	22,95	23,25	0,30
14	24,90	25,39	0,49

Os resultados mostrados na Tab. (4-1) apontam os erros observados, considerando como tal a diferença entre os valores medidos e os teóricos (calculados). Com exceção do espelho 1, todos os outros espelhos apresentaram um erro inferior a 0,5°.

4.2 SIMULAÇÃO DOS ANGULOS DOS ESPELHOS

Como método comparativo entre os valores calculados, já definidos anteriormente, e com os valores medidos, foi realizado a simulação computacional do ângulo de inclinação de cada espelho, θ_n . Para que a simulação reproduzisse de forma mais fiel possível o experimento, foi analisado todo o conjunto montado. Neste caso, o programa que permite maior facilidade, devido ao uso de

ferramentas específicas para isso, foi o Tonatiuh. A simulação foi feita considerando o dia 10 de setembro de 2018, pois foi o primeiro dia em que estavam disponíveis os equipamentos para as medições, bem como condições climáticas favoráveis.

No referido programa, após a determinação da posição dos espelhos, foram inseridos os valores dos dados geográficos, de data e de horário. O local para inserção destes valores é mostrado na Fig. (4-3). A mesma simulação foi realizada considerando cada um dos espelhos e seus valores são mostrados na Tab. (4.2).

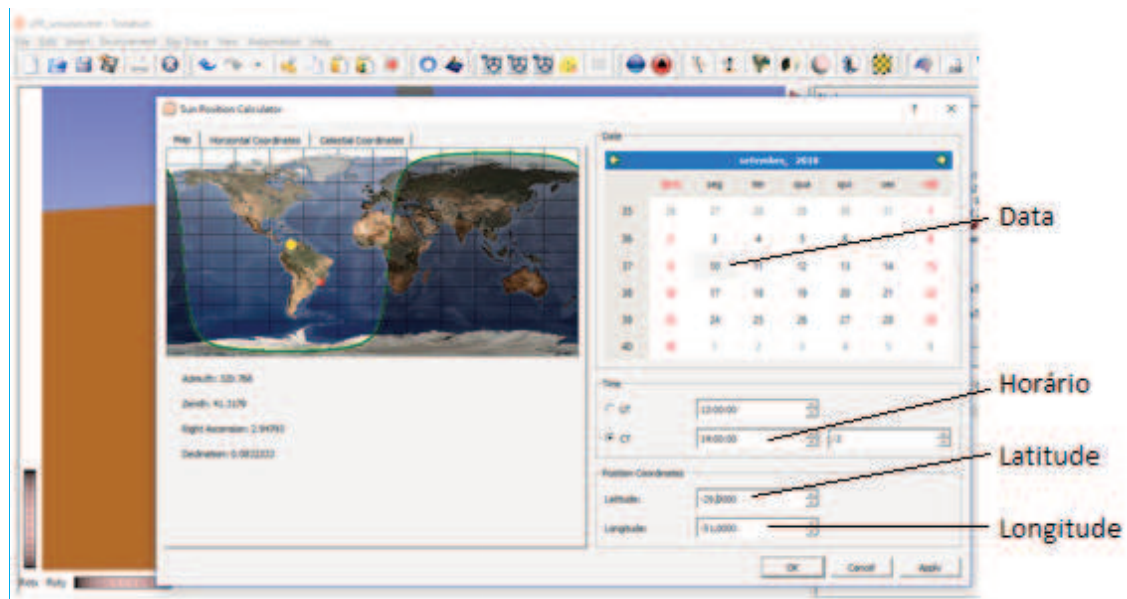


Figura 4-3 - Tela do programa Tonatiuh com as coordenadas geográficas da instalação e com dados preparados para o dia 10 de setembro de 2018, às 14h.

A determinação da posição dos espelhos é mostrada na Fig. (4-4). O valor do ângulo de inclinação nela indicado refere-se ao primeiro espelho a oeste (pelo padrão adotado no presente trabalho, considerado como espelho número sete), em que o valor de sua inclinação é dado como 0,22791 rad (12,76°) .

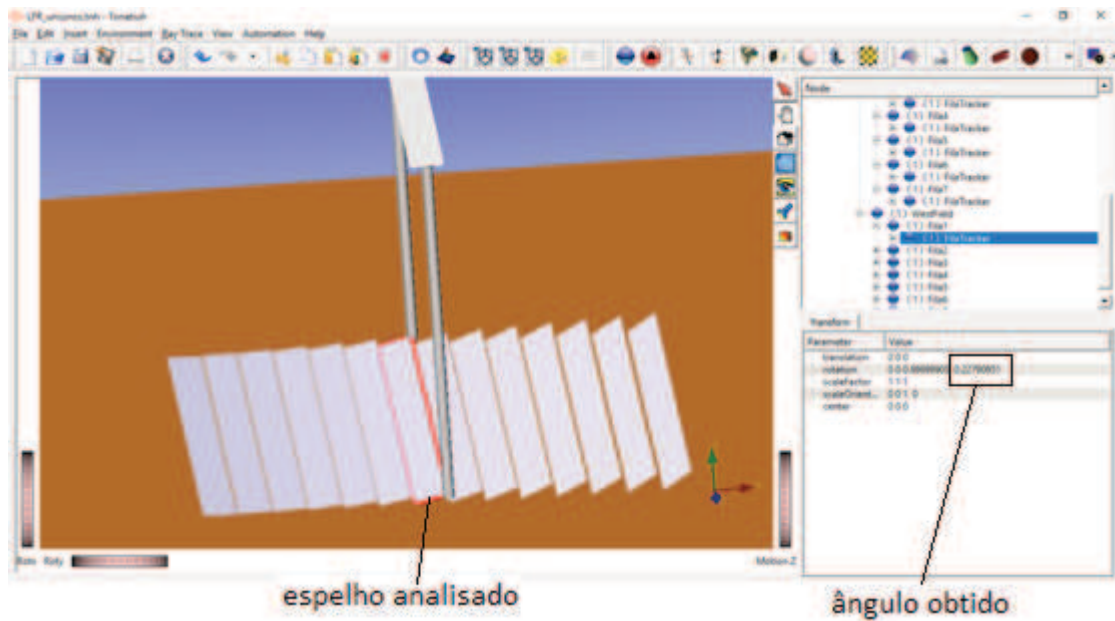


Figura 4-4 - Tela mostrando a estrutura completa do sistema e a inclinação do espelho número sete, com 0,22791 radianos.

4.3 MEDIÇÕES COM O SENSOR DE INCLINAÇÃO

Para efetuar a medição de maneira precisa, levando em conta a curvatura dos espelhos, o sensor de inclinação foi fixado em uma cantoneira de alumínio, com comprimento de 300 mm, medida compatível com a largura de cada espelho. Esse conjunto foi calibrado através de seu posicionamento sobre uma mesa de desempenho de granito, marca TecnoGran, modelo DG-1610, com planeza de 10 μm , conforme mostrado na Fig. (4-5), localizada no Laboratório de Metrologia da Unisinos. Após o posicionamento, foi pressionado o botão de “zero”. A partir deste procedimento, o sensor passou a reconhecer a posição da mesa como zero grau (0°), servindo como referência para as demais medições, como as mostradas na Fig. (4-6).

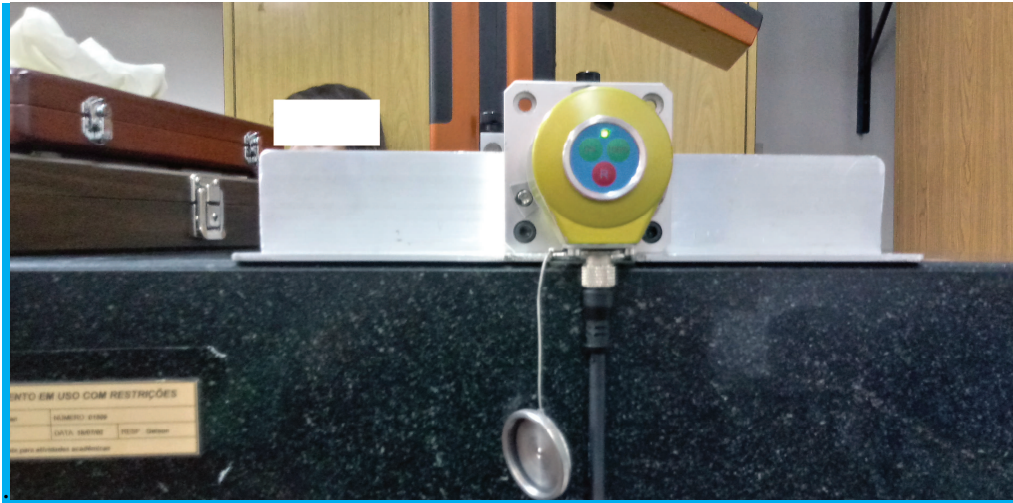


Figura 4-5- Calibração do sensor de inclinação no desempenho de granito do Laboratório de Metrologia- Unisinos –Campus São Leopoldo.



Figura 4-6 – Medição do ângulo θ_n através do sensor de inclinação adaptado à cantoneira.

Os valores foram medidos pelo sensor de inclinação e sua leitura foi possível através do conjunto formado também pelo conversor e pelo módulo Arduino, mostrados no LCD, conforme Fig. (4-7) onde também é mostrada a data e o horário corrente, além do valor do ângulo de inclinação do espelho θ_n calculado naquele horário para o espelho número 1, que foi escolhido como referência

na automação por estar mais próximo do motor. Abaixo deste valor é mostrado o ângulo de inclinação θ_n medido. Neste caso, a medida é de $0,2^\circ$ para o dia 10 de setembro de 2018 às 14h, medida feita no espelho número 2, mostrado também da Tab. (4-2).



Figura 4-7 - Disposição do LCD da central de controle durante a medição da inclinação dos espelhos com o sensor de inclinação.

4.4 ANÁLISE DOS VALORES OBTIDOS

Os valores obtidos do cálculo, da medição e da simulação do posicionamento dos espelhos foram colocados nas Tab. (4-2) e Tab. (4-3). A primeira linha de cada tabela refere-se ao número de cada espelho, iniciando do Oeste para o Leste, mostrado na Fig. (3-5). A segunda linha mostra os valores obtidos na simulação para o ângulo de inclinação de cada espelho, θ_n , em radianos, que é a unidade nativa do software Tonatiuh. A segunda linha mostra esses valores na unidade de graus ($^\circ$), a terceira linha mostra os valores obtidos através do cálculo, enquanto que na quarta linha de cada tabela está o valor medido em campo, através dos métodos explicados no capítulo 4.3. Todos os valores referem-se ao dia 10 de setembro de 2018 às 14h.

Tabela 4-2-Valores verificados no dia 10 de setembro de 2018 às 14 h nos espelhos à oeste do absorvedor (1 a 7).

Espelho (nº)	1	2	3	4	5	6	7
Simulado (rad)	0,04	0,00	0,03	0,08	0,12	0,17	0,22
Simulado ($^\circ$)	2,40	0,26	2,06	4,59	7,29	10,13	12,86
Calculado ($^\circ$)	2,39	0,26	2,07	4,60	7,30	10,13	13,06
Medido ($^\circ$)	2,40	0,20	2,00	4,60	7,40	10,20	13,00

Tabela 4-3 -Valores verificados no dia 10 de setembro de 2018 às 14 h nos espelhos à leste do absorvedor (8 a 14).

Espelho (n°)	8	9	10	11	12	13	14
Simulado (rad)	0,27	0,33	0,38	0,42	0,47	0,51	0,54
Simulado (°)	16,01	18,94	21,77	24,47	27,00	29,34	31,48
Calculado (°)	16,02	18,81	21,78	24,48	27,01	29,34	31,48
Medido (°)	16,00	18,80	21,80	24,40	27,00	29,40	31,40

O desvio entre os valores medidos e calculados no dia 10/09/ 2018 as 14 h para cada um dos 14 espelhos são mostrados no gráfico da Fig. (4-8), onde é observado o maior valor de $0,1^\circ$ para o espelho número 5. Os demais espelhos mostram um valor de desvio abaixo de $0,1^\circ$. O desvio entre os valores medidos e os valores obtidos na simulação no dia 10/09/ 2018 as 14 h, para cada um dos 14 espelhos, são mostrados no gráfico da Fig (4-9), onde é observado o maior valor de $0,14^\circ$ para o espelho número 7 e $-0,14$ para o espelho 9. Os demais espelhos apresentam um desvio abaixo destes valores.

Analisando tais resultados, é possível afirmar que o sistema de rastreamento apresenta precisão satisfatória, visto que todos os desvios ficaram abaixo limite máximo de $0,2^\circ$ estipulado na seção 3.1.

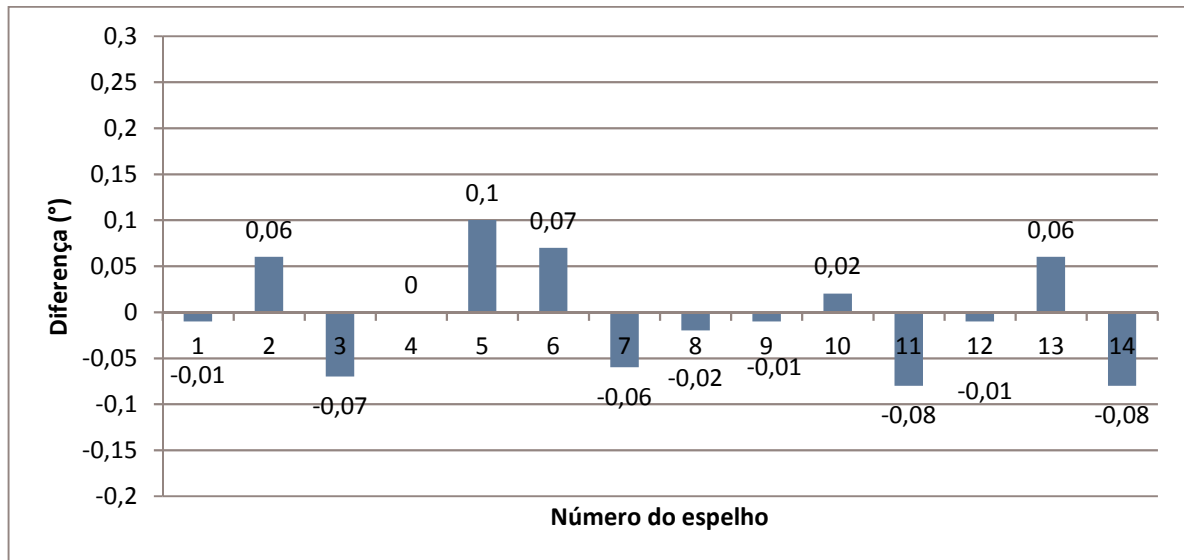


Figura 4-8 - Diferença entre os valores medidos e os valores calculados para o dia 10/09/18.

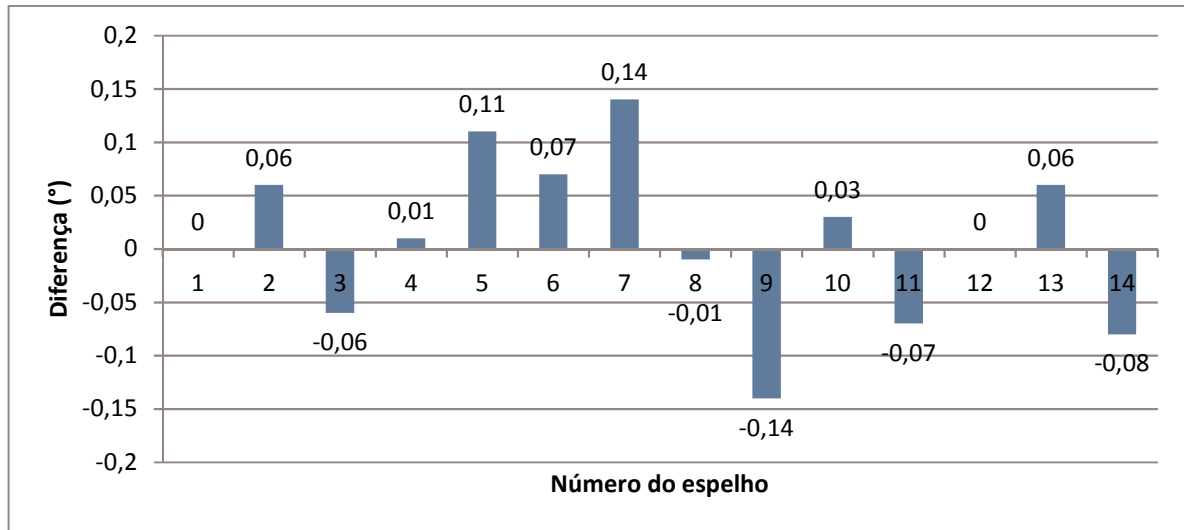


Figura 4-9 - Diferença entre os valores medidos e os valores obtidos na simulação para o dia 10/09/18.

4.4.1 Análise visual

A Fig. (4.10) mostra a radiação concentrada pelo conjunto de espelhos no absorvedor, no horário das 12:20 no dia 20/11/2018. É possível verificar que a radiação refletida abrange toda a área do absorvedor.

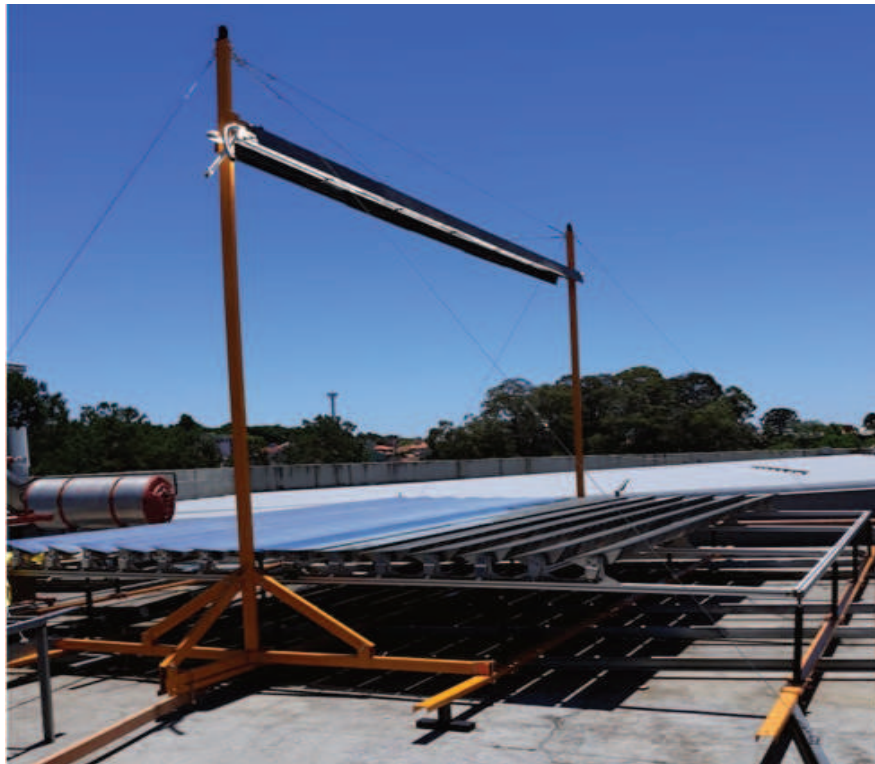


Figura 4-10 – Concentração da radiação solar no conjunto absorvedor com os espelhos em operação.

A Fig. (4-11) evidencia a radiação refletida no absorvedor através da capturada da imagem térmica no dia 20 /11/18 ÀS 12:20 com a câmera termográfica marca Flir, modelo E-40. A tela do software disponibiliza algumas informações adicionais, como emissividade com valor de 0,95 que é o valor comumente encontrado para o tipo de acabamento superficial empregado no absorvedor, isso é, tubos e chapa pintadas com tinta fosca na cor preta, com tinta para alta temperatura. Além disso, a imagem mostra que a totalidade da área do absorvedor ficou com temperatura superior à 150 °C.

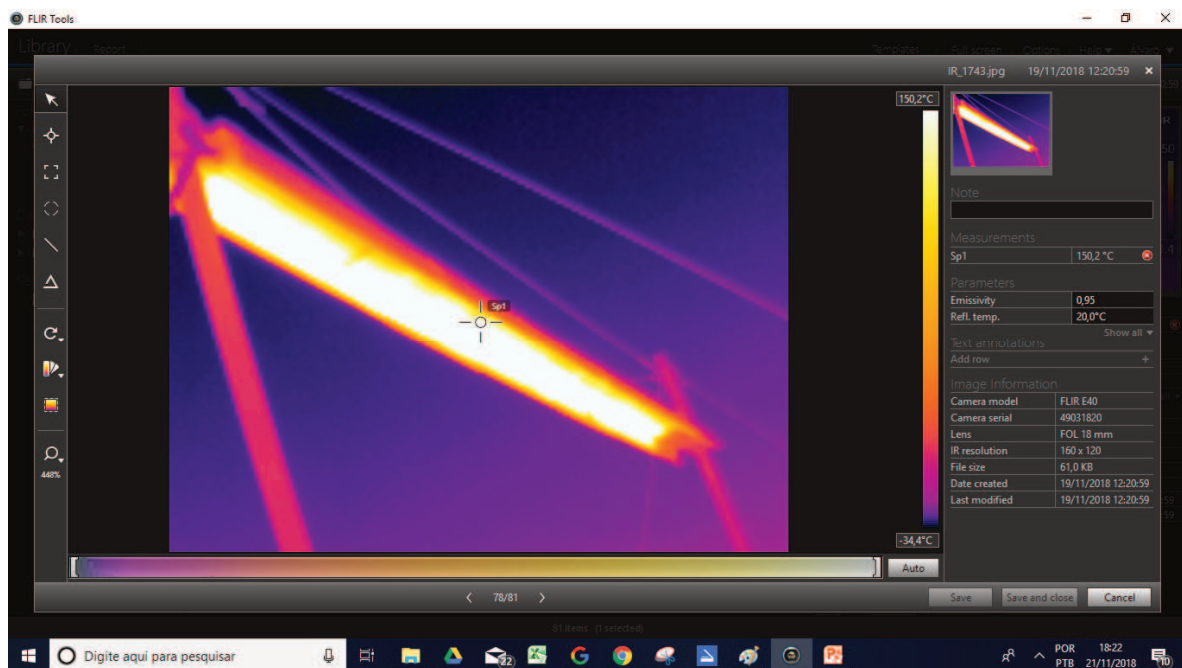


Figura 4-11 - Imagem térmica do absorvedor com os espelhos em operação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes práticos realizados com os sistemas de medição, juntamente com as simulações e com a observação da radiação refletida no absorvedor Fig.(4-10) e Fig. (4-11), serviram como parâmetro para demonstrar a funcionalidade do sistema, demonstrando que é possível obter em tempo real os ângulos de azimute e zênite através da utilização de um algoritmo de posição solar baseado em variáveis de tempo e localização geográfica. Os mesmos parâmetros também foram utilizados para avaliar o posicionamento dos espelhos comparando com os valores de saída do sistema de controle, reafirmando a importância de todo o conjunto de componentes utilizados.

O circuito de correção, baseado no sensor de inclinação ajudou a manter os valores calculados e medidos dentro do observado na Fig. (5-1).

O tempo de resposta do motor em função do ciclo de atualização do sistema também foi considerado satisfatório, pois observou-se que cada pulso do motor ($0,018^\circ$) leva em torno de 1 milésimo de segundo para ser executado (ANEXO B). Assim sendo, a variação do motor de passo responsável pelo posicionamento dos espelhos é realizada de forma tão rápida que seu tempo em relação a variação da posição solar aparente se torna desprezível.

Também foram realizadas simulações para verificar a precisão necessária que o método de rastreamento deveria ter para se manter dentro dos limites da área de concentração do sistema absorvedor. Os resultados encontrados na Seção (3.1.1.3.2) mostraram que o valor máximo de erro aceitável para o ângulo de inclinação dos espelhos θ_n é $0,2^\circ$, o que justifica o uso algoritmo de rastreamento baseado no método de Reda e Andreas (2008).

Outro fator relevante que foi observado é que a diferença angular entre os espelhos se mantém constante ao longo do dia, o que comprova que é possível efetuar a movimentação de todo o conjunto através de apenas um eixo de posicionamento, confirmando assim a viabilidade de sistemas que optam por empregar esse tipo de movimentação.

Cabe também ressaltar que, embora os ângulos utilizados na determinação da posição solar foram o azimute, o ângulo de zênite e o ângulo de elevação solar, o código de programação foi estruturado de forma a conter o maior número possível de variáveis dentro do chamado “corpo” do programa, o que confere maior flexibilidade em caso de novas configurações, bem como a opção de deixar disponíveis as demais variáveis utilizadas no programa, facilitando o acesso e a modificação por outros usuários facilitando assim a implementação de trabalhos futuros. Este fator torna-se muito importante à medida em que trabalhos que utilizarem esse tipo de tecnologia possam fazer a sua implementação utilizando o mesmo código fonte do programa. Deve ser observado também que além da economia de tempo, a estruturação do sistema foi feita utilizando componentes

que apresentam um custo relativamente baixo e de fácil adaptação, principalmente por serem dedicados aos módulos Arduínos, como por exemplo um relógio, responsável pela atualização do horário (RTC) e um display de cristal líquido 16 x 2, este último com o intuito de mostrar ao usuário os principais dados atualizados do programa.

REFERÊNCIAS

- AL-NAIMA, F. M.; ALI R. S.; ABID, A. J., Design and implementation of a smart dual axis sun tracker based on astronomical equations, **EWRES12**, Antalia, Turkey, 2012.
- AL-ROUSAN, N.; ISA, N.A.M.; DESA M .K.M. Advances in solar photovoltaic tracking systems : **A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. August 2017, p. 2548–2569, 2018.
- BLANCO-MURIEL, M.; ALARCON-PADILLA, D.C.; LÓPEZ-MORATALLA, T.;LARA-COIRA, M. **Computing the solar vector. Solar Energy**, vol.70, pp. 431-441. 2001
- CAVALCANTE, C. N. S. **C. Controle e instrumentação de energia solar fotovoltaica e térmica com um grau de liberdade**. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasil, 2016.
- CRUZ, J. A. M. **Diseño de un Concentrador Solar Lineal Tipo Fresnel de Faja Entalpía para Calor de Procesos** -Dissertação de Mestrado. Universidad Veracruzana, Xalapa, México 2012.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Thermal Processes Solar Engineering**. 4th. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- FATHABADI, H. Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems. **Applied Energy**, v. 173, p. 448–459, 2016.
- KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004.
- KOMANDURI, R.; HOU, Z. B. A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology. v. 34, p. 653–682, 2001.
- LODI, C. **Perspectivas para a geração de energia elétrica no Brasil utilizando a tecnologia solar térmica concentrada**. Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Energético. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- 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.
- MICHALSKY, J.J., 1988. **The astronomical almanac’s algorithm for approximate solar position**. *Solar Energy*, vol. 40, pp.227-235.
- MOUSAZADEH, H.; KEYHANI, A.; JAVADI, A.; MOBLI, H.; ABRINIA, K.; SHARIFI, A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 1800–1818, 2009.

MULLER, J. C. **Estudo Geométrico de Um Refletor Fresnel Linear para Produção de Energia Térmica**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, Brasil, 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 1 ed. ed. Rio de Janeiro: Centro de Referencia para Energia Solar e Eólica, 2014.

PLATZER, W.; DINTER F.; CUEVAS F., **Low-Cost Linear Fresnel Collector**, [s.l.] ESTAGE - STE, 2016.

PRINSLOO,G.;DOBSON,R; **Solar Tracking** ,SolarBooks [s.l];,2015.

REDA, I.; ANDREAS, A. **Solar position algorithm for solar radiation applications**. Solar Energy, v. 76, n. 5, p. 577–589, 2008.

REVISTA SOL BRASIL, "Aquecedores Solares Geraram o Equivalente a 8 mil GWh em 2015"- DASOL - Departamento Nacional de Energia Solar Térmica da ABRAVA. São Paulo, ed.30, p. 6, Janeiro, 2016.Disponível em: <https://issuu.com/revistasolbrasil/docs/revista_sol_brasil_30>

SEME, S.; STUMBERGER, B.; HADZISELIMOVIC, M., 2016. A novel prediction algorithm for solar angles using second derivative of the energy for photovoltaic sun tracking purposes. **Solar Energy**, vol. 137, pp. 201-211

SUMATHY, K.; LIN, M; 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, n. 1–2, p. 963–972, 2013.

YAO, Y.; HU, Y.; GAO, S.; YANG, G.; DU, J. A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. **Renewable Energy**, v. 72, p. 88–98, 2014.

YILMAZ, S.; OZCALIK, H. R.; DOGMUS, O.; DINCER, F.; AKGOL, O.; KARAASLAN, M. Design of two axes sun tracking controller with analytically solar radiation calculations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 997–1005, 2015.

APÊNDICE A-TABELAS COMPARATIVAS ENTRE OS MODELOS DE EQUACIONAMENTO.

A análise comparativa dos ângulos solares obtidos com os cálculos baseados nos 2 métodos analisados para Zênite e de Azimute é mostrada na Tab. (A.1), para o dia 15 de janeiro de 2018, na Tab. (A.2) para o dia 25 de Abril, na Tab. (A.3) para o dia 25 de Julho, e na Tab. (A.4) para o dia 25 de Outubro, todos referentes ao ano de 2018 e realizados em 6 horários diferentes.

Tabela A-1 Comparação entre os modelos de Duffie e Beckman (2013) e de Redas e Andreas (2008) para o cálculo dos ângulos de zênite e de azimute, para o dia 15 de janeiro, em seis horários diferentes.

15/01/2018	Duffie		Reda e Andeas		Diferença	
Hora oficial	Zênite (°)	Azimute (°)	Zênite (°)	azimute (°)	Zênite (°)	Azimute (°)
08:00	28,63	260,57	28,42	260,69	0,21	-0,12
10:00	54,57	274,79	54,33	275	0,24	-0,21
12:00	78,66	316,76	78,37	316,74	0,29	0,02
14:00	68,71	288,53	68,77	289,35	-0,06	-0,82
16:00	42,97	267,82	43,08	268,24	-0,11	-0,42
18:00	17,29	254,95	17,41	255,3	-0,12	-0,35

Tabela A-2 Comparação entre os modelos de Duffie e Beckman (2013) e de Redas e Andreas (2008) para o cálculo dos ângulos de zênite e de azimute, para o dia 25 de Abril, em seis horários diferentes.

25/04/2018	Duffie		Reda e Andeas		Diferença	
Hora oficial	Zênite (°)	Azimute (°)	Zênite (°)	Azimute (°)	Zênite (°)	Azimute (°)
08:00	13,75	293,92	13,62	294,19	0,13	-0,27
10:00	35,19	315,97	34,93	316,24	0,26	-0,27
12:00	46,94	351,93	46,57	352	0,37	-0,07
14:00	41,26	327,68	40,91	327,93	0,35	-0,25
16:00	22,44	301,02	22,19	301,37	0,25	-0,35
18:00	-1,6	284	-1,67	284,39	0,07	-0,39

Tabela A-3 Comparação entre os modelos de Duffie e Beckman (2013) e de Redas e Andreas (2008) para o cálculo dos ângulos de zênite e de azimute, para o dia 25 de Julho, em seis horários diferentes.

25/07/2018	Duffie		Reda e Andreas		Diferença	
Hora oficial	Zênite	Azimute	Zênite	Azimute	Zênite	Azimute
08:00	8,04	298,41	8,29	298,23	-0,25	0,18
10:00	28,46	319,03	28,69	318,86	-0,23	0,17
12:00	39,81	350,44	40,09	350,4	-0,28	0,04
14:00	35,96	333,95	36,24	333,8	-0,28	0,15
16:00	19,37	308,01	19,62	307,77	-0,25	0,24
18:00	-3,32	291,01	-3,06	290,73	-0,26	0,28

Tabela A-4 Comparação entre os modelos de Duffie e Beckman (2013) e de Redas e Andreas (2008) para o cálculo dos ângulos de zênite e de azimute, para o dia 25 de Outubro, em seis horários diferentes.

25/10/2018	Duffie		Reda e Andreas		Diferença	
Hora oficial	Zênite	Azimute	Zênite	Azimute	Zênite	Azimute
08:00	29,91	273,26	30,08	272,91	-0,17	0,35
10:00	55,18	294,17	55,4	293,65	-0,22	0,52
12:00	71,93	353,19	72,31	353,04	-0,38	0,15
14:00	58,53	298,87	58,8	298,25	-0,27	0,62
16:00	33,64	275,57	33,87	275,11	-0,23	0,46
18:00	7,69	260,73	8,03	260,31	-0,34	0,42

A Tabela (A-5) mostra o valor do ângulo (em graus) para o sistema baseado no trabalho de Reda e Andreas (2008), de cada espelho, considerando o dia 15 de Janeiro de 2018, nos horários de 8h, 10h, 12h, 14h, 16h e 18h. A Tab.(A-6) mostra as mesmas variáveis, porém baseadas no equacionamento de Duffie e Beckman (2013). A Tab. (A-7) mostra a diferença de valores encontrada entre os dois métodos onde a maior diferença foi encontrada nos horários das oito horas (0,1 graus) em praticamente todos os espelhos exceto o espelho nove. A Tab. (A-8) por sua vez mostra a variação dos valores dos ângulos entre os espelhos evidenciando inclusive que o mesmo se mantém constantes independente do horário do dia e da época do ano, corroborando com o tipo de acionamento preparado para apenas um motor controlar todos os espelhos.

Tabela A-5- Valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), em cada espelho, baseados no modelo de Reda e Andreas (2008) para o dia 15 de Janeiro de 2018 em seis horários diferentes.

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	47,56	45,43	43,09	40,56	37,86	35,03	32,1	29,14	26,21	23,38	20,68	18,15	15,81	13,68
10:00	34,69	32,55	30,22	27,69	24,99	22,15	19,23	19,23	13,34	10,5	7,81	5,28	2,94	0,8
12:00	20,92	18,78	16,45	13,92	11,22	8,38	5,46	2,5	-0,43	-3,26	-5,96	-8,49	-10,83	-12,97
14:00	6,85	4,71	2,38	-0,15	-2,85	-5,69	-8,61	-11,57	-14,5	-17,33	-20,03	-22,56	-24,9	-27,04
16:00	-6,54	-8,68	-11,02	-13,54	-16,24	-19,08	-22,01	-24,96	-27,89	-30,73	-33,43	-35,95	-38,29	-40,43
18:00	-19,14	-21,28	-23,62	-26,14	-28,84	-31,68	-34,61	-37,56	-40,49	-43,33	-46,03	-48,56	-50,89	-53,03

Tabela A-6- Valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), em cada espelho, para o dia 15 de Janeiro de 2018 em seis horários diferentes baseados em Dufie e Beckman (2013).

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	47,46	45,33	42,99	40,46	37,76	34,93	32	29,04	26,12	23,28	20,58	18,05	15,71	13,58
10:00	34,61	32,47	30,14	27,61	24,91	22,07	19,15	19,15	13,26	10,43	7,73	5,2	2,86	0,72
12:00	20,86	18,72	16,38	13,85	11,15	8,32	5,39	2,43	-0,49	-3,33	-6,03	-8,56	-10,89	-13,03
14:00	6,8	4,67	2,33	-0,2	-2,9	-5,73	-8,66	-11,62	-14,54	-17,38	-20,08	-22,61	-24,94	-27,08
16:00	-6,56	-8,7	-11,04	-13,56	-16,26	-19,1	-22,03	-24,98	-27,91	-30,75	-33,45	-35,97	-38,31	-40,45
18:00	-19,12	-21,26	-23,6	-26,13	-28,82	-31,66	-34,59	-37,55	-40,47	-43,31	-46,01	-48,54	-50,87	-53,01

Tabela A-7 –Diferença entre valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), para cada espelho, para o dia 15 de Janeiro de 2018 em seis horários diferentes comparando os dois métodos apresentados.

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,09	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10:00	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
12:00	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06
14:00	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
16:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
18:00	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02

Tabela A-8- Diferença entre os vvalores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), para cada espelho. (A linha superior mostra o intervalo entre os dois espelhos que está sendo considerado) para o dia 15 de Janeiro de 2018 em seis horários diferentes baseados no relatório de Reda e Andreas (2008).

HORÁRIO	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15
08:00	2,13	2,34	2,53	2,7	2,83	2,93	2,96	2,93	2,83	2,7	2,53	2,34	2,13	2,13
10:00	2,14	2,34	2,53	2,7	2,84	2,93	2,96	5,88	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
12:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,92	2,96	2,93	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
14:00	2,13	2,34	2,53	2,7	2,83	2,93	2,96	2,92	2,84	2,7	2,53	2,33	2,14	2,13
16:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,93	2,95	2,93	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
18:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,92	2,96	2,93	2,83	2,7	2,53	2,34	2,14	2,14

A Tabela (A-9) mostra o valor do ângulo (em graus) para o sistema baseado no relatório de Reda e Andreas (2008) de cada espelho considerando o dia 25 de Abril de 2018, nos horários de 8h, 10h, 12h, 14h, 16h e 18h. A Tab. (A-10) mostra as mesmas variáveis, porém baseadas no equacionamento de Duffie e Beckeman (2013). A Tab. (A-11) mostra a diferença de valores encontrada entre os dois métodos onde a maior diferença foi encontrada nos horários das oito horas (0,1 graus) em praticamente todos os espelhos exceto o espelho nove. A Tab. (A-12) por sua vez mostra a variação dos valores dos de ângulos entre os espelhos evidenciando inclusive que o mesmo se mantém constantes independente do horário do dia e da época do ano, corroborando com o tipo de acionamento preparado para apenas um motor controlar todos os espelhos.

Tabela A-9- Valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), em cada espelho, para o dia 25 de Abril de 2018 em seis horários diferentes baseados no relatório de Reda e Andreas (2008).

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	47,56	45,43	43,09	40,56	37,86	35,03	32,1	29,14	26,21	23,38	20,68	18,15	15,81	13,68
10:00	34,69	32,55	30,22	27,69	24,99	22,15	19,23	19,23	13,34	10,5	7,81	5,28	2,94	0,8
12:00	20,92	18,78	16,45	13,92	11,22	8,38	5,46	2,5	-0,43	-3,26	-5,96	-8,49	-10,83	-12,97
14:00	6,85	4,71	2,38	-0,15	-2,85	-5,69	-8,61	-11,57	-14,5	-17,33	-20,03	-22,56	-24,9	-27,04
16:00	-6,54	-8,68	-11,02	-13,54	-16,24	-19,08	-22,01	-24,96	-27,89	-30,73	-33,43	-35,95	-38,29	-40,43
18:00	-19,14	-21,28	-23,62	-26,14	-28,84	-31,68	-34,61	-37,56	-40,49	-43,33	-46,03	-48,56	-50,89	-53,03

Tabela A-10- Valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), em cada espelho, para o dia 15 de Janeiro de 2018 em seis horários diferentes baseados em Dufie e Beckman (2013).

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	47,46	45,33	42,99	40,46	37,76	34,93	32	29,04	26,12	23,28	20,58	18,05	15,71	13,58
10:00	34,61	32,47	30,14	27,61	24,91	22,07	19,15	19,15	13,26	10,43	7,73	5,2	2,86	0,72
12:00	20,86	18,72	16,38	13,85	11,15	8,32	5,39	2,43	-0,49	-3,33	-6,03	-8,56	-10,89	-13,03
14:00	6,8	4,67	2,33	-0,2	-2,9	-5,73	-8,66	-11,62	-14,54	-17,38	-20,08	-22,61	-24,94	-27,08
16:00	-6,56	-8,7	-11,04	-13,56	-16,26	-19,1	-22,03	-24,98	-27,91	-30,75	-33,45	-35,97	-38,31	-40,45
18:00	-19,12	-21,26	-23,6	-26,13	-28,82	-31,66	-34,59	-37,55	-40,47	-43,31	-46,01	-48,54	-50,87	-53,01

Tabela A-11- Diferença entre valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), para cada espelho, para o dia 25 de Abril de 2018 em seis horários diferentes comparando os dois métodos apresentados.

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,09	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10:00	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
12:00	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06
14:00	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
16:00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
18:00	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02

Tabela A-12- Diferença entre os valores de ângulos de inclinação θ_n (em graus), para cada espelho. (A linha superior mostra o intervalo entre os dois espelhos que está sendo considerado) para o dia 25 de Abril de 2018 em seis horários diferentes baseados no relatório de Reda e Andreas (2008).

Horário	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15
08:00	2,13	2,34	2,53	2,7	2,83	2,93	2,96	2,93	2,83	2,7	2,53	2,34	2,13	2,13
10:00	2,14	2,34	2,52	2,7	2,84	2,93	0	5,88	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
12:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,92	2,96	2,93	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
14:00	2,13	2,34	2,53	2,7	2,83	2,93	2,96	2,92	2,84	2,7	2,53	2,33	2,14	2,13
16:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,93	2,95	2,93	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
18:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,92	2,96	2,93	2,83	2,7	2,53	2,34	2,14	2,14

A Tab. (A-12) mostra o valor do ângulo (em graus) para o sistema baseado no relatório de Andreas e Reda (2008) de cada espelho considerando o dia 25 de julho de 2018, e Dezoito, nos horários de 8h, 10h, 12h, 14h, 16h e 18h. A Tab. (A-14) mostra as mesmas variáveis, porém baseadas no equacionamento de Duffie e Beckeman (2013). A Tab. (A-15) mostra a diferença de valores encontrada entre os dois métodos onde a maior diferença foi encontrada nos horários das 18h (0,15 graus) em cinco espelhos. A Tab. (A-16) por sua vez mostra a variação dos valores dos ângulos entre os espelhos evidenciando inclusive que o mesmo se mantém constantes independente do horário do dia, corroborando com o tipo de acionamento preparado para apenas um motor controlar todos os espelhos.

Tabela A-13- Valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), em cada espelho, para o dia 25 de Julho de 2018 em seis horários diferentes baseados no relatório de Reda e Andreas (2008).

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	57,25	55,11	52,77	50,25	47,55	44,71	41,78	38,83	35,9	33,06	30,36	27,84	25,5	23,36
10:00	42,07	39,93	37,59	35,06	32,37	29,53	26,6	26,6	20,72	17,88	15,18	12,65	10,32	8,18
12:00	22,55	20,41	18,07	15,54	12,85	10,01	7,08	4,12	1,2	-1,64	-4,34	-6,87	-9,2	-11,34
14:00	1,41	-0,73	-3,06	-5,59	-8,29	-11,13	-14,05	-17,01	-19,94	-22,77	-25,47	-28	-30,34	-32,48
16:00	-15,92	-18,06	-20,39	-22,92	-25,62	-28,46	-31,38	-34,34	-37,27	-40,11	-42,8	-45,33	-47,67	-49,81
18:00	60,31	58,17	55,83	53,31	50,61	47,77	44,84	41,89	38,96	36,12	33,42	30,9	28,56	26,42

Tabela A-14- Valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), em cada espelho, para o dia 25 de Julho de 2018 em seis horários diferentes baseados em Duffie e Beckman (2013) .

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	57,38	55,24	52,91	50,38	47,68	44,84	41,92	38,96	36,03	33,2	30,5	27,97	25,63	23,49
10:00	42,15	40,01	37,68	35,15	32,45	29,61	26,69	26,69	20,8	17,97	15,27	12,74	10,4	8,27
12:00	22,58	20,44	18,1	15,58	12,88	10,04	7,11	4,16	1,23	-1,61	-4,31	-6,83	-9,17	-11,31
14:00	1,35	-0,79	-3,12	-5,65	-8,35	-11,19	-14,12	-17,07	-20	-22,84	-25,54	-28,06	-30,4	-32,54
16:00	-16,03	-18,17	-20,51	-23,03	-25,73	-28,57	-31,5	-34,46	-37,38	-40,22	-42,92	-45,45	-47,78	-49,92
18:00	60,17	58,03	55,69	53,16	50,46	47,63	44,7	41,74	38,82	35,98	33,28	30,75	28,42	26,28

Tabela A-15- Diferença entre valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), para cada espelho, para o dia 25 de Julho de 2018 em seis horários diferentes comparando os dois métodos apresentados.

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	-0,13	-0,13	-0,14	-0,13	-0,13	-0,13	-0,14	-0,13	-0,13	-0,14	-0,14	-0,13	-0,13	-0,13
10:00	-0,08	-0,08	-0,09	-0,09	-0,08	-0,08	-0,09	-0,09	-0,08	-0,09	-0,09	-0,09	-0,08	-0,09
12:00	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,03
14:00	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06
16:00	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11
18:00	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14

Tabela (A-16) - Diferença entre os valores de ângulos de inclinação θ_n (em graus), para cada espelho. (A linha superior mostra o intervalo entre os dois espelhos que está sendo considerado) para o dia 25 de Julho de 2018 em seis horários diferentes baseados no relatório de Reda e Andreas (2008).

Horário	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15
08:00	2,14	2,34	2,52	2,7	2,84	2,93	2,95	2,93	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
10:00	2,14	2,34	2,52	2,7	2,84	2,93	0	5,88	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
12:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,92	2,96	2,93	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
14:00	2,13	2,34	2,53	2,7	2,83	2,93	2,96	2,92	2,84	2,7	2,53	2,33	2,14	2,13
16:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,93	2,95	2,93	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
18:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,92	2,96	2,93	2,83	2,7	2,53	2,34	2,14	2,14

A Tab.(A-17) mostra o valor do ângulo (em graus) para o sistema baseado no relatório de Reda e Andreas (2008) de cada espelho considerando o dia 25 de julho de 2018, nos horários de 8h, 10h, 12h, 14h, 16h e 18h. A Tab. (A-18) mostra as mesmas variáveis, porém baseadas no equacionamento de Duffie e Beckeman (2013). A Tab.(A-19) mostra a diferença de valores encontrada entre os dois métodos onde a maior diferença foi encontrada nos horários das 18 h (0,66 graus) em cinco espelhos. A Tab.(A-20) por sua vez mostra a variação dos valores dos de ângulos entre os espelhos evidenciando inclusive que o mesmo se mantém constantes independente do horário do dia, corroborando com o tipo de acionamento preparado para apenas um motor controlar todos os espelhos.

Tabela A-17- Valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), em cada espelho, para o dia 25 de Outubro de 2018 em seis horários diferentes baseados no relatório de Reda e Andreas (2008).

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	46,89	44,75	42,41	39,89	37,19	34,35	31,42	28,47	25,54	22,7	20	17,47	15,14	13
10:00	33,09	30,95	28,61	26,09	23,39	20,55	17,62	17,62	11,74	8,9	6,2	3,68	1,34	-0,8
12:00	18,05	15,91	13,58	11,05	8,35	5,51	2,59	-0,37	-3,3	-6,14	-8,84	-11,36	-13,7	-15,84
14:00	1,39	-0,74	-3,08	-5,61	-8,31	-11,14	-14,07	-17,03	-19,95	-22,79	-25,49	-28,02	-30,35	-32,49
16:00	-10,93	-13,07	-15,4	-17,93	-20,63	-23,47	-26,4	-29,35	-32,28	-35,12	-37,82	-40,34	-42,68	-44,82
18:00	-23,51	-25,65	-27,98	-30,51	-33,21	-36,05	-38,97	-41,93	-44,86	-47,69	-50,39	-52,92	-55,26	-57,4

Tabela A-18- Valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), em cada espelho, para o dia 25 de Outubro de 2018 em seis horários diferentes baseados em Dufie e Beckman (2013).

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	46,97	44,83	42,49	39,97	37,27	34,43	31,5	28,55	25,62	22,78	20,08	17,56	15,22	13,08
10:00	33,14	31	28,67	26,14	23,44	20,6	17,68	17,68	11,79	8,96	6,26	3,73	1,39	-0,75
12:00	18,05	15,91	13,58	11,05	8,35	5,51	2,59	-0,37	-3,3	-6,13	-8,83	-11,36	-13,7	-15,84
14:00	2,85	0,71	-1,63	-4,15	-6,85	-9,69	-12,62	-15,57	-18,5	-21,34	-24,04	-26,57	-28,9	-31,04
16:00	-11,17	-13,31	-15,65	-18,18	-20,88	-23,71	-26,64	-29,6	-32,52	-35,36	-38,06	-40,59	-42,92	-45,06
18:00	-24,16	-26,3	-28,64	-31,16	-33,86	-36,7	-39,63	-42,58	-45,51	-48,35	-51,05	-53,57	-55,91	-58,05

Tabela A-19 - Diferença entre valores de ângulo de inclinação θ_n (em graus), para cada espelho, para o dia 25 de Outubro de 2018 em seis horários diferentes comparando os dois métodos apresentados.

Horário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
08:00	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,09	-0,08	-0,08
10:00	-0,05	-0,05	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,06	-0,06	-0,05	-0,06	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05
12:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,01	-0,01	0	0	0
14:00	-1,46	-1,45	-1,45	-1,46	-1,46	-1,45	-1,45	-1,46	-1,45	-1,45	-1,45	-1,45	-1,45	-1,45
16:00	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24
18:00	0,65	0,65	0,66	0,65	0,65	0,65	0,66	0,65	0,65	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65

Tabela A-20- Diferença entre os valores dos ângulos de inclinação θ_n (em graus), para cada espelho. (A linha superior mostra o intervalo entre os dois espelhos que está sendo considerado) para o dia 25 de Outubro de 2018 em seis horários diferentes baseados no relatório de Reda e Andreas (2008)

Horário	1-2	2 -3	3- 4	4-5	5- 6	6- 7	7- 8	8- 9	9- 10	10- 11	11-12	12- 13	13-14	14-15
08:00	2,14	2,34	2,52	2,7	2,84	2,93	2,95	2,93	2,84	2,7	2,53	2,33	2,14	2,14
10:00	2,14	2,34	2,52	2,7	2,84	2,93	0	5,88	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
12:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,92	2,96	2,93	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
14:00	2,13	2,34	2,53	2,7	2,83	2,93	2,96	2,92	2,84	2,7	2,53	2,33	2,14	2,13
16:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,93	2,95	2,93	2,84	2,7	2,52	2,34	2,14	2,14
18:00	2,14	2,33	2,53	2,7	2,84	2,92	2,96	2,93	2,83	2,7	2,53	2,34	2,14	2,14

APÊNDICE B-PROGRAMAÇÃO NO MÓDULO ARDUÍNO

//BASEADO EM SOLAR POSITION ALGORITHM FOR SOLAR RADIATION

APPLICATIONS-NREL*****

//*****ADAPTADO_POR_ÁLVARO_D._OLIVEIRA*****

//*****ETAPA DO MÓDULO RTC*****

#include <LiquidCrystal.h>

#include <DS1307.h>

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

DS1307 rtc(A4, A5);

void setup()

{

 // put your setup code here, to run once:

 //Aciona o relógio

 rtc.halt(false);

 //As linhas abaixo setam a data e hora do módulo

 //e podem ser comentada após a primeira utilização

 rtc.setDOW; //Define o dia da semana

 rtc.setTime(20, 47, 00); //Define o horário

 rtc.setDate(12, 9, 2017); //Define o dia, mês e ano

 //Definições do pino SQW/Out

 rtc.setSQWRate(SQW_RATE_1);

 rtc.enableSQW(true);

 lcd.begin(16, 2);

 Serial.begin(9600);

}

void loop()

```

{
//Mostra as informações no Serial Monitor
  Serial.print("Hora : ");
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("HORA: ");
  Serial.print(rtc.getTimeStr());
  lcd.print(rtc.getTimeStr());
  Serial.print(" ");
  Serial.print("Data : ");
  Serial.print(rtc.getDateStr(FORMAT_SHORT));
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("DATA: ");
  lcd.print(rtc.getDateStr(FORMAT_SHORT));
  Serial.print(" ");
  Serial.println(rtc.getDOWStr(FORMAT_SHORT));

  //Aguarda 1 segundo e repete o processo
  delay (1000); // put your main code here, to run repeatedly:

}

```

//***** PROGRAMA PARA OBTER O ANGULO DO ESPELHO UTILIANDO
 ASPECTOS TEMPORAIS, GEOGRÁFICOS E CONSTRUTIVOS*****

```

void setup() {
//***** Declaração das variáveis Utilizadas no
programa:*****
  Serial.begin(9600);
  float JD3=0.000;
  float JD2=0.00;
  float qqr=0.00;
  float qq=0.00;
  float JDD2=0.00;
  float UTC_corr=0.00;

```

```
float UTC=-3;
float Elev;
float e_00;
float e_02;
float rr;
float s_int;
float s;
float t_int;
float r_int;
double JDD=0;
float AZ_astronomico;
float AZ_int;
float Aza1;
float e_0T_graus;
float e_0T;
float e_01T;
float e_01;
float Lat_rad;
float H_rad;
float Csi;
float D_b;
float alfarad;
float teste;
float Lamb_rad;
float Erad;
float DBrad;
float Betaa;
float H1;
float H20;
float H3;
float H4;
float Delta_graus;
float alfa1;
float alfa2;
```

```
float ALFAb;  
float alfa_graus;  
float alfaesp;  
float alfaa;  
float alfac;  
float ALFA;  
float Beta;  
float LL;  
float Lesp;  
int LLa;  
float LLc;  
float Termo_Y;  
float Deltab=0;  
float PARAL=0;  
float K1=0;  
float K2=0;  
float K3=0;  
float Delta_2=0;  
float Deltaa=0;  
float Alfa2=0;  
float D_alfa=0;  
float D_a=0;  
float H=0;  
float AZa=0;  
float delta=0;  
float Termo_y=0;  
float Termo_x=0;  
float Azimute=0;  
float AZ_astr_graus=0;  
float AZ_astr=0;  
float Zenith=0;  
float Ang_el=0;  
float D_E=0;  
float e_0_graus=0;
```

```
float H2=0;
float pressao_atm=0.82;
float Temper_md=20;
float El=30.00;
float Lat=29.800;
float Long=-51.16;
float Delta=0;
float alfa=0;
float alf=0;
float V=0;
float e_0=0;
float pressao=0;
float Aza=0;
float Vo=0;
float Lamb=0;
float D_TAU;
float E=0;
float E0=0;
float D_EPSILON=0;
float D_PSI=0;
float U=0;
float fi=0;
float LAT=0;
float DE1=0;
float DE2=0;
float DE3=0;
float DE4=0;
float DE5=0;
float DE6=0;
float DE7=0;
float DE8=0;
float DP1=0;
float DP2=0;
float DP3=0;
```

```
float DP4=0;
float DP5=0;
float DP6=0;
float DP7=0;
float XY1=0;
float XY2=0;
float XY3=0;
float XY4=0;
float XY5=0;
float XY6=0;
float XY7=0;
float XY8=0;
float XY9=0;
float XY10=0;
float XY11=0;
float XY12=0;
float XY13=0;
float XY14=0;
float XY15=0;
float XY16=0;
float XY17=0;
float XY18=0;
float XY19=0;
float XY20=0;
float XY21=0;
float XY22=0;
float XY23=0;
float XY24=0;
float XY25=0;
float XY26=0;
float XY27=0;
float XY28=0;
float XY29=0;
float XY30=0;
```

```
float XY31=0;
float XY32=0;
float XY33=0;
float XY34=0;
float XY35=0;
float XY36=0;
float XY37=0;
float XY38=0;
float XY39=0;
float XY40=0;
float XY41=0;
float XY42=0;
float XY43=0;
float XY44=0;
float XY45=0;
float XY46=0;
float XY47=0;
float XY48=0;
float XY49=0;
float XY50=0;
float XY51=0;
float XY52=0;
float XY53=0;
float XY54=0;
float XY55=0;
float XY56=0;
float XY57=0;
float XY58=0;
float XY59=0;
float XY60=0;
float XY61=0;
float XY62=0;
float XY63=0;
float DB0=0;
```

```
float DB1=0;
float DB=0;
float R0=0;
float R1=0;
float R3=0;
float R4=0;
float R=0;
float R0a=0;
float R0b=0;
float R0c=0;
float R0d=0;
float R0e=0;
float R0f=0;
float R0g=0;
float R0h=0;
float R1a=0;
float R1b=0;
float R1c=0;
float R2=0;
float x4=0;
float x3=0;
float x2=0;
float x1=0;
float xo=0;
float L1=0;
float L=0;
float Lgraus=0;
float L5=0;
float L4=0;
float L3=0;
float L3a=0;
float L3b=0;
float L2=0;
float L2c=0;
```

```
float L2d=0;
float L2e=0;
float L2a=0;
float L2b=0;
float L1j=0;
float L1i=0;
float L1h=0;
float L1g=0;
float L1f=0;
float L1d=0;
float L1c=0;
float L1b=0;
float L1a=0;
float L11=0;
float L0=0;
float loq=0;
float lop=0;
float loo=0;
float lon=0;
float lom=0;
float lol=0;
float loj=0;
float loi=0;
float loh=0;
float lor=0;
float lof=0;
float loe=0;
float lod=0;
float loc=0;
float lob=0;
float loa=0;
float lo=0;
float l1=0;
float l2=0;
```

```

float l3=0;
float l4=0;
float l5=0;
float ai;
float bi;
float ci;
float jme=0;
float jce=0;
float jc=0;
float dt=67;
float jde=0;
float jd = 0;
float p;
float q;
float r = 0;
float t = 0;
float a = 0;
int c = 0;
float b = 0;
float y=2017.0;
float dia=30.0;
float hora=09.0;
float minuto=00.0;
float segundo=00.0;
float diadeci;
float mes=08.0;
//***** Cálculo do dia
juliano*****
//*****início das isntruções da calculadora
solar*****
//***** CONVERSÃO DO DIA
DECIMAL.******
diadeci=dia+(hora/24.0)+(minuto/(24*60.0))+(segundo/86400.0);

```

```

//*****ADAPATAÇÃO DO CALENDÁRIO GREGORIANO PARA O
JULIANO*****:

```

```

a=int(y/100.0);

```

```

c=a/4.0;

```

```

b=2-a+c;

```

```

//*****

```

VARIÁVEIS

```

EXTRAS*****

```

```

r=365.25*(y+4716);

```

```

rr=r-2454110;

```

```

s=int(rr);

```

```

s_int=s+2454110.00000;

```

```

t=30.6001*(mes+1);

```

```

t_int=int(t);

```

```

p=s_int+t_int;

```

```

q=diadeci+b;

```

```

//COMPENSAÇÃO DO FUSO HORÁRIO:

```

```

UTC_corr=UTC/24;

```

```

qq=q+UTC_corr;

```

```

qqr=(qq)-1524.50000;

```

```

JD2=p-2450000.0000;

```

```

JD3=JD2+qqr;

```

```

JDD=JD3+2450000;

```

```

jd=JDD;

```

```

jd=2452930.512847;

```

```

//Serial.println(jd,6);

```

```

jde=jd+(dt/86400);

```

```

jc=(jd-2451545)/36525;

```

```

jce=(jde-2451545)/36525;

```

```

jme=jce/10;

```

```

//*****Cálculo o vetor de longitude heliocêntrica da Terra
(L)*****:

```

```

//Utilização adaptada da tabela para cálculo do fator L0

```

$$\begin{aligned}
\text{loa} &= (175347046 * \cos(0.0 + 0.0 * \text{jme})) + (3341656 * \cos(4.6692568 + 6283.07585 * \text{jme})) + (3489 \\
&4 * \cos(4.6261 + 12566.1517 * \text{jme})) + (3497 * \cos(2.7441 + 5753.3849 * \text{jme})); \\
\text{lob} &= (3418 * \cos(2.8289 + 3.5231 * \text{jme})) + (3136 * \cos(3.6277 + 77713.7715 * \text{jme})) + (2676 * \cos(4 \\
&.4181 + 7860.4194 * \text{jme})) + (2343 * \cos(6.1352 + 3930.2097 * \text{jme})); \\
\text{loc} &= (1324 * \cos(0.7425 + 11506.7698 * \text{jme})) + (1273 * \cos(2.0371 + 529.691 * \text{jme})) + (1199 * \cos(\\
&1.1096 + 1577.3435 * \text{jme})) + (990 * \cos(5.2330 + 5884.927 * \text{jme})); \\
\text{lod} &= (902 * \cos(2.0450 + 26.298 * \text{jme})) + (857 * \cos(3.508 + 398.149 * \text{jme})) + (780 * \cos(1.1790 + 5 \\
&223.694 * \text{jme})) + (753 * \cos(2.533 + 5507.553 * \text{jme})); \\
\text{loe} &= (505 * \cos(4.583 + 18849.228 * \text{jme})) + (492 * \cos(4.205 + 775.523 * \text{jme})) + (357 * \cos(2.92 + 0. \\
&067 * \text{jme})) + (317 * \cos(5.849 + 11790.629 * \text{jme})); \\
\text{lof} &= (284 * \cos(1.899 + 796.298 * \text{jme})) + (271 * \cos(0.3150 + 10977.079 * \text{jme})) + (243 * \cos(0.3450 \\
&+ 5486.778 * \text{jme})) + (206 * \cos(4.8060 + 2544.314 * \text{jme})); \\
\text{lor} &= (205 * \cos(1.869 + 5573.143 * \text{jme})) + (202 * \cos(2.458 + 6069.777 * \text{jme})) + (156 * \cos(0.833 + 2 \\
&13.299 * \text{jme})) + (132 * \cos(3.411 + 2942.463 * \text{jme})); \\
\text{loh} &= (126 * \cos(1.083 + 20.775 * \text{jme})) + (115 * \cos(0.6450 + 0.98 * \text{jme})) + (103 * \cos(0.6360 + 4694. \\
&003 * \text{jme})) + (102 * \cos(0.976 + 15720.8390 * \text{jme})); \\
\text{loi} &= (102 * \cos(4.2670 + 7.114 * \text{jme})) + (99 * \cos(6.2100 + 2146.7 * \text{jme})) + (98 * \cos(0.68 + 155.42 * \text{j} \\
&\text{me})) + (86 * \cos(5.98 + 161000.69 * \text{jme})); \\
\text{loj} &= (85 * \cos(1.3000 + 6275.96 * \text{jme})) + (85 * \cos(3.67 + 71430.7 * \text{jme})) + (80 * \cos(1.81 + 17260.1 \\
&5 * \text{jme})) + (79 * \cos(3.04 + 12036.46 * \text{jme})); \\
\text{lol} &= (75 * \cos(1.76 + 5088.63 * \text{jme})) + (74 * \cos(3.5 + 3154.69 * \text{jme})) + (74 * \cos(4.68 + 801.82 * \text{jme} \\
&) + (70 * \cos(0.83 + 9437.76 * \text{jme})); \\
\text{lom} &= (62 * \cos(3.98 + 8827.39 * \text{jme})) + (61 * \cos(1.82 + 7084.9 * \text{jme})) + (57 * \cos(2.78 + 6286.6 * \text{jme} \\
&\text{e})) + (56 * \cos(4.39 + 14143.5 * \text{jme})); \\
\text{lon} &= (56 * \cos(3.47 + 6279.55 * \text{jme})) + (52 * \cos(0.19 + 12139.55 * \text{jme})) + (52 * \cos(1.33 + 1748.02 * \\
&\text{jme})) + (51 * \cos(0.28 + 5856.48 * \text{jme})); \\
\text{loo} &= (49 * \cos(0.49 + 1194.45 * \text{jme})) + (41 * \cos(5.37 + 8429.24 * \text{jme})) + (41 * \cos(2.4 + 19651.05 * \text{j} \\
&\text{me})) + (39 * \cos(6.17 + 10447.39 * \text{jme})); \\
\text{lop} &= (37 * \cos(6.04 + 10213.29 * \text{jme})) + (37 * \cos(2.57 + 1059.38 * \text{jme})) + (36 * \cos(1.71 + 2352.87 * \\
&\text{jme})) + (36 * \cos(1.78 + 6812.77 * \text{jme})); \\
\text{loq} &= (33 * \cos(0.59 + 17789.85 * \text{jme})) + (30 * \cos(0.44 + 83996.85 * \text{jme})) + (30 * \cos(2.74 + 1349.87 \\
&* \text{jme})) + (25 * \cos(3.16 + 4690.48 * \text{jme})); \\
\text{L0} &= \text{loa} + \text{lob} + \text{loc} + \text{lod} + \text{loe} + \text{lof} + \text{lor} + \text{loh} + \text{loi} + \text{loj} + \text{lol} + \text{lom} + \text{lon} + \text{loo} + \text{lop} + \text{loq};
\end{aligned}$$

//Utilização adaptada da tabela para cálculo do fator L1:

$$L1a=(628331966747*\cos(0+0*jme))+(206059*\cos(2.678235+6283.07585*jme))+(4303*\cos(2.6351+12566.1517*jme))+(425*\cos(1.59+3.523*jme));$$

$$L1b=(119*\cos(6+26*jme))+(109*\cos(3+1.577*jme))+(93*\cos(2.59+18849.23*jme))+(72*\cos(1.14+529.69*jme));$$

$$L1c=(68*\cos(1.87+398.15*jme))+(67*\cos(4.41+5507.55*jme))+(59*\cos(2.89+5223.69*jme))+(56*\cos(2.17+155.42*jme));$$

$$L1d=(45*\cos(0.4+796.3*jme))+(36*\cos(0.47+775.52*jme))+(29*\cos(2.65+7.11*jme))+(21*\cos(5.34+0.98*jme));$$

$$L1f=(19*\cos(1.85+5486.78*jme))+(19*\cos(4.97+213.3*jme))+(17*\cos(2.99+6275.96*jme))+(16*\cos(0.03+2544.31*jme));$$

$$L1g=(16*\cos(1.43+2146.17*jme))+(15*\cos(1.21+10977.08*jme))+(12*\cos(2.83+1748.02*jme))+(12*\cos(3.26+5088.63*jme));$$

$$L1h=(12*\cos(5.27+1194.45*jme))+(12*\cos(2.08+4694*jme))+(11*\cos(0.77+553.57*jme))+(10*\cos(1.3+6286.6*jme));$$

$$L1i=(10*\cos(4.24+1349.87*jme))+(9*\cos(2.7+242.73*jme))+(9*\cos(5.64+951.72*jme))+(8*\cos(5.3+2352.87*jme));$$

$$L1j=(6*\cos(2.65+9437.76*jme))+(109*\cos(4.67+4690.148*jme));$$

$$L1=L1a+L1b+L1c+L1d+L1f+L1g+L1h+L1i+L1j;$$

//Utilização adaptada da tabela para cálculo do fator L2:

$$L2a=(52919*\cos(0+0*jme))+(8720*\cos(1.0721+6283*jme))+(309*\cos(0.867+12566.152*jme))+(27*\cos(0.05+3.52*jme));$$

$$L2b=(16*\cos(5.19+26.3*jme))+(16*\cos(3.68+155.42*jme))+(10*\cos(0.76+18849.23*jme))+(9*\cos(2.06+77713.77*jme));$$

$$L2c=(7*\cos(0.83+775.52*jme))+(5*\cos(4.66+1577.34*jme))+(4*\cos(1.03+7.11*jme))+(4*\cos(3.44+5573.14*jme));$$

$$L2d=(3*\cos(5.14+796.3*jme))+(3*\cos(6.05+5507.55*jme))+(3*\cos(1.19+242.73*jme))+(3*\cos(6.12+529.69*jme));$$

$$L2e=(3*\cos(0.31+398.15*jme))+(3*\cos(2.28+553.57*jme))+(2*\cos(4.38+5223.69*jme))+(2*\cos(3.75+0.98*jme));$$

$$L2=L2a+L2b+L2c+L2d+L2e;$$

//Utilização adaptada da tabela para cálculo do fator L3:

```

L3a=(289*cos(5.844+6283.076*jme))+(35*cos(0+0*jme))+(17*cos(5.49+12566.15*jme))
+(3*cos(5.2+155.42*jme));

L3b=(1*cos(4.72+3.52*jme))+(1*cos(5.3+18849.23*jme))+(1*cos(5.97+242.73*jme));

L3=L3a+L3b;

//Utilização adaptada da tabela para cálculo do fator L4:
L4=(114*cos(3.142+0*jme))+(8*cos(4.13+6283.08*jme))+(1*cos(3.84+12566.15*jme));

//Utilização adaptada da tabela para cálculo do fator L5:
L5=(1*cos(3.14+0*jme));
//Serial.println(L5,6);

//Cálculo geral do fator L:
LL=(L0+L1*jme+L2*(jme*jme)+L3*(jme*jme*jme)+L4*(jme*jme*jme*jme)+L5*(jme*
jme*jme*jme*jme))/100000000;
Lgraus=LL*180/(3.1415926535898);
Lesp=Lgraus/360;
LLa=int(Lgraus/360);
LLc=Lesp-LLa;
L=360*LLc;

//*****Calcule da latitude geocêntrica, (em
graus)*****
DB0=(280*cos(3.199+84334.662*jme))+(102*cos(5.422+5507.553*jme))+(80*cos(3.88+
5223.69*jme))+(44*cos(3.7+2352.87*jme))+(32*cos(4+1577.34*jme));
//DB0=-176.502688;
DB1=(9*cos(3.9+5507.55*jme))+(6*cos(1.73+5223.69*jme));
//DB1=3.067582;
DBrad=(DB0+DB1*jme)/100000000;
DB=DBrad*180/(3.1415926535898);

//*****Cálculo o vetor do raio heliocêntrico da
Terra (R)*****

```

$$R0a=(100013989*\cos(0.0000+0.0*jme))+(1670700*\cos(3.0985+6283.1*jme))+(13956*\cos(3.0553+12566.2*jme))+(3084*\cos(5.1985+77713.8*jme))+(1628*\cos(1.1739+5753.4*jme));$$

$$R0b=(1576*\cos(2.8469+7860.4*jme))+(925*\cos(5.4530+11506.8*jme))+(542*\cos(4.5640+3930.2*jme))+(472*\cos(3.6610+5884.9*jme))+(346*\cos(0.964+5507.6*jme));$$

$$R0c=(329*\cos(5.9+5223.7*jme))+(307*\cos(0.299+5.573*jme))+(243*\cos(4.27+11.791*jme))+(212*\cos(5.85+1577.344*jme))+(186*\cos(5.022+10.977*jme))+(175*\cos(3.012+18.849*jme));$$

$$R0d=(110*\cos(5.055+5.487*jme))+(\quad \quad \quad 98 \\ * \cos(0.890+6069.78*jme))+(86*\cos(5.690+15720.84*jme))+(86*\cos(1.270+161000.69*jme))+(65*\cos(0.270+17260.15*jme))+(63*\cos(0.920+529.69*jme));$$

$$R0e=+(57*\cos(2.010+83996.85*jme))+ \\ (56*\cos(5.240+71430.7*jme))+(49*\cos(3.250+2544.31*jme))+(47*\cos(2.580+775.52*jme))+(45 \\ * \cos(5.540+94370.76*jme));$$

$$R0f=+(43*\cos(6.010+6275.96*jme))+(39*\cos(5.360+4694*jme))+(\quad \quad \quad 38 \\ * \cos(2.390+8827.39*jme))+(37*\cos(0.830+19651.05*jme))+(37*\cos(4.900+12139.55*jme));$$

$$R0g=(36*\cos(1.670+12036.46*jme))+(35*\cos(1.840+2942.46*jme))+(33*\cos(0.240+708 \\ 4.9*jme))+(32*\cos(0.180+5088.63*jme));$$

$$R0h=(32*\cos(1.780+398.15*jme))+(\quad \quad \quad 28*\cos(1.210+6286.6*jme))+(\\ 28*\cos(1.900+6279.55*jme))+(26*\cos(4.590+10447.39*jme));$$

$$R0=R0a+R0b+R0c+R0d+R0e+R0f+R0g+R0h;$$

//R1

$$R1a=(103019*\cos(1.10749+6283.075850*jme))+(1721*\cos(1.06440+12566.1517*jme))+(\\ 702*\cos(3.14200+0*jme))+(32*\cos(1.02000+18849.23*jme));$$

$$R1b=(31*\cos(2.84+5507.55*jme))+(25*\cos(1.32000+522369*jme))+(18*\cos(1.420+1577 \\ .34*jme))+(10*\cos(5.910+10977.08*jme));$$

$$R1c=(9*\cos(1.420+6275.96*jme))+(9*\cos(0.270+5486.78*jme));$$

$$R1=R1a+R1b+R1c;$$

//R2

$$R2=(4359*\cos(5.7846+6.283*jme))+(124*\cos(5.5790+12.566*jme))+(12*\cos(3.1400+0*j \\ me))+(9*\cos(3.63+77713.77*jme))+(6*\cos(1.87+5573.14*jme))+(3*\cos(5.47+18849.23*jme));$$

//R3

$$R3=(145*\cos(4.273+6283.08*jme))+(7*\cos(3.920+12566.15*jme));$$

$$R4=(4*\cos(2.560+6283.08*jme));$$

```

R=(R0+R1*jme+R2*pow(jme,2)+R3*pow(jme,3)+R4*pow(jme,4))/pow(10,8);

//*****Cálculo a longitude geocêntrica e a latitude ("Geocêntrico" significa
que a posição do Sol é calculada em relação ao centro da Terra.*****

Beta=-1*DB;
fi=L+180;
LAT=-DB;

//*****Calculo a nutação em longitude e
obliquidade ( ) R e g)*****.
//*****Calcule o alongamento médio da
lua a partir do Sol, X0 (em graus)*****

xo=297.85036+445267.111480*jce-0.0019142*(jce*jce)+((jce*jce*jce)/189474);

//*****Cálculo a anomalia média do Sol-
Terra, X1 (em graus)*****
x1=357.52772+35999.050340*jce-0.0001603*(jce*jce)-((jce*jce*jce)/300000);

//*****Calcule a anomalia média da lua, X2 (em
graus),*****
x2=134.96298+477198.867398*jce+0.0086972*(jce*jce)+((jce*jce*jce)/56250);

//*****Cálculo do argumento da latitude da
lua, X3 (em graus),*****
x3=93.27191+483202.017538*jce-0.0036825*(jce*jce)+((jce*jce*jce)/327270);

//*****Cálculo da longitude do nó ascendente da órbita média da lua na
eclíptica, medida a partir do equinócio médio da data, X4 (em graus),
x4=125.04452-1934.136261*jce+0.0020708*(jce*jce)+((jce*jce*jce)/450000);

//*****Termos periódicos para
longitude oblqua*****

```

$XY1=0*x_0+0*x_1+0*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY2=-2*x_0+0*x_1+0*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY3=0*x_0+0*x_1+0*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY4=0*x_0+0*x_1+0*x_2+0*x_3+2*x_4;$
 $XY5=0*x_0+1*x_1+0*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY6=0*x_0+0*x_1+1*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY7=-2*x_0+1*x_1+0*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY8=0*x_0+0*x_1+0*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY9=0*x_0+0*x_1+1*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY10=-2*x_0-1*x_1+0*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY11=-2*x_0+0*x_1+1*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY12=-2*x_0+0*x_1+0*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY13=0*x_0+0*x_1-1*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY14=2*x_0+0*x_1+0*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY15=0*x_0+0*x_1+1*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY16=2*x_0+0*x_1-1*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY17=0*x_0+0*x_1-1*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY18=0*x_0+0*x_1+1*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY19=-2*x_0+0*x_1+2*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY20=0*x_0+0*x_1-2*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY21=2*x_0+0*x_1+0*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY22=0*x_0+0*x_1+2*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY23=0*x_0+0*x_1+2*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY24=-2*x_0+0*x_1+1*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY25=0*x_0+0*x_1+0*x_2+2*x_3+0*x_4;$
 $XY26=-2*x_0+0*x_1+0*x_2+2*x_3+0*x_4;$
 $XY27=0*x_0+0*x_1-1*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY28=0*x_0+2*x_1+0*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY29=-2*x_0+0*x_1-1*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY30=-2*x_0+2*x_1+0*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY31=0*x_0+1*x_1+0*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY32=-2*x_0+0*x_1+1*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY33=0*x_0-1*x_1+0*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY34=0*x_0+0*x_1+2*x_2-2*x_3+0*x_4;$

$XY35=2*x_0+0*x_1-1*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY36=2*x_0+0*x_1+1*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY37=0*x_0+1*x_1+0*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY38=-2*x_0+1*x_1+1*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY39=0*x_0-1*x_1+0*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY40=2*x_0+0*x_1+0*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY41=2*x_0+0*x_1+1*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY42=-2*x_0+0*x_1+2*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY43=-2*x_0+0*x_1+1*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY44=2*x_0+0*x_1-2*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY45=2*x_0+0*x_1+0*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY46=0*x_0-1*x_1+1*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY47=-2*x_0-1*x_1+0*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY48=-2*x_0+0*x_1+0*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY49=0*x_0+0*x_1+2*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY50=-2*x_0+0*x_1+2*x_2+0*x_3+1*x_4;$
 $XY51=-2*x_0+1*x_1+0*x_2+2*x_3+1*x_4;$
 $XY52=0*x_0+0*x_1+1*x_2-2*x_3+0*x_4;$
 $XY53=-1*x_0+0*x_1+1*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY54=-2*x_0+0*x_1+2*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY55=1*x_0+0*x_1+0*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY56=0*x_0+0*x_1+1*x_2+2*x_3+0*x_4;$
 $XY57=0*x_0+0*x_1-2*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY58=-1*x_0-1*x_1+1*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY59=0*x_0+1*x_1+1*x_2+0*x_3+0*x_4;$
 $XY60=0*x_0-1*x_1+1*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY61=2*x_0-1*x_1-1*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY62=0*x_0+0*x_1+3*x_2+2*x_3+2*x_4;$
 $XY63=2*x_0-1*x_1+0*x_2+2*x_3+2*x_4;$

//Coeficiente ´ para delta psi

$$DP1=(-171996-174.2*jce)*\sin(XY1)+(-13187-1.6*jce)*\sin(XY2)+(-2274-0.2*jce)*\sin(XY3)+(2062+0.2*jce)*\sin(XY4)+(142-3.4*jce)*\sin(XY5)+(712+0.1*jce)*\sin(XY6)+(-517+1.2*jce)*\sin(XY7)+(-386-0.4*jce)*\sin(XY8);$$

$$DP2=(-301+0*jce)*\sin(XY9)+(217-0.5*jce)*\sin(XY10)+(-158+0*jce)*\sin(XY11)+(129+0.1*jme)*\sin(XY12)+(123+0*jce)*\sin(XY13)+(63+0*jce)*\sin(XY14)+(63+0.1*jce)*\sin(XY15)+(-59+0*jce)*\sin(XY16);$$

$$DP3=(-58-0.1*jce)*\sin(XY17)+(-51+0*jce)*\sin(XY18)+(48+0*jce)*\sin(XY19)+(46+0*jce)*\sin(XY20)+(-38+0*jce)*\sin(XY21)+(-31+0*jce)*\sin(XY22)+(29+0*jce)*\sin(XY23)+(29+0*jce)*\sin(XY24)+(26+0*jme)*\sin(XY25);$$

$$DP4=(-22+0*jce)*\sin(XY26)+(21+0*jce)*\sin(XY27)+(17-0.1*jce)*\sin(XY28)+(16+0*jce)*\sin(XY29)+(16+0.1*jce)*\sin(XY30)+(-15+0*jce)*\sin(XY31)+(-13+0*jce)*\sin(XY32)+(-12+0*jce)*\sin(XY33)+(11+0*jme)*\sin(XY34);$$

$$DP5=(-10+0*jce)*\sin(XY35)+(-8+0*jce)*\sin(XY36)+(7-0*jce)*\sin(XY37)+(-7+0*jce)*\sin(XY38)+(-7+0*jce)*\sin(XY39)+(-7+0*jce)*\sin(XY40)+(6+0*jme)*\sin(XY41)+(6-0*jce)*\sin(XY42);$$

$$DP5=(6-0*jce)*\sin(XY43)+(-6+0*jce)*\sin(XY44)+(-6+0*jce)*\sin(XY45)+(5+0*jce)*\sin(XY46)+(-5+0*jce)*\sin(XY47)+(-5+0*jce)*\sin(XY48)+(-5+0*jme)*\sin(XY49)+(4+0*jce)*\sin(XY50)+(4+0*jce)*\sin(XY51);$$

$$DP6=(4+0*jce)*\sin(XY52)+(-4+0*jce)*\sin(XY53)+(-4+0*jce)*\sin(XY54)+(-4+0*jce)*\sin(XY55)+(3+0*jce)*\sin(XY56)+(-3+0*jce)*\sin(XY57)+(-3+0*jme)*\sin(XY58)+(-3+0*jce)*\sin(XY59)+(-3+0*jce)*\sin(XY60);$$

$$DP7=(-3+0*jce)*\sin(XY61)+(-3+0*jce)*\sin(XY62)+(-3+0*jce)*\sin(XY63);$$

//coeficiente para delta epsilon

$$DE1=(92025+8.9*jce)*\cos(XY1)+(5736-3.1*jce)*\cos(XY2)+(977-0.5*jce)*\cos(XY3)+(-895+0.5*jce)*\cos(XY4)+(54-0.1*jce)*\cos(XY5)+(-7+0*jce)*\sin(XY6)+(224-0.6*jce)*\cos(XY7)+(200+0*jce)*\cos(XY8);$$

$$DE2=(129-0.1*jce)*\cos(XY9)+(-95+0.3*jce)*\cos(XY10)+(0*jce)*\cos(XY11)+(-70+0*jce)*\cos(XY12)+(-53+0*jce)*\cos(XY13)+(0*jce)*\cos(XY14)+(-33+0*jce)*\cos(XY15)+(26+0*jce)*\cos(XY16)+(32+0*jce)*\cos(XY17);$$

$$DE3=(-27+0*jce)*\cos(XY18)+(0*jce)*\cos(XY19)+(-24+0*jce)*\cos(XY20)+(16+0*jce)*\cos(XY21)+(13+0*jce)*\cos(XY22)+(0*jce)*\cos(XY23)+(-12+0*jce)*\cos(XY24)+(0*jce)*\cos(XY25)+(0*jce)*\cos(XY26);$$

$$DE4=(-10+0*jce)*\cos(XY27)+(0*jce)*\cos(XY28)+(-8+0*jce)*\cos(XY29)+(7+0*jce)*\cos(XY30)+(9+0*jce)*\cos(XY31)+(7+0*jce)*\cos(XY32)+(6+0*jce)*\cos(XY33)+(0+0*jce)*\cos(XY34)+(5+0*jce)*\cos(XY35);$$

$$DE5=(3+0*jce)*\cos(XY36)+(-3+0*jce)*\cos(XY38)+(0*jce)*\cos(XY39)+(3+0*jce)*\cos(XY40)+(3+0*jce)*\cos(XY41)+(0+0*jce)*\cos(XY42)+(-3+0*jce)*\cos(XY43)+(-3+0*jce)*\cos(XY44)+(3+0*jce)*\cos(XY45);$$

$$DE6=(3+0*jce)*\cos(XY46)+(0+0*jce)*\cos(XY47)+(3+0*jce)*\cos(XY48)+(3+0*jce)*\cos(XY49)+(3+0*jce)*\cos(XY50)+(0+0*jce)*\cos(XY51)+(0*jce)*\cos(XY52)+(0*jce)*\cos(XY53)+(0+0*jce)*\cos(XY54);$$

$$DE7=(0*jce)*\cos(XY55)+(0*jce)*\cos(XY56)+(0*jce)*\cos(XY57)+(0*jce)*\cos(XY58)+(0*jce)*\cos(XY59)+(0*jce)*\cos(XY60)+(0*jce)*\cos(XY61)+(0*jce)*\cos(XY62)+(0+0*jce)*\cos(XY63);$$

//Delta psi= cálculo da notação da longitude em graus:

$$D_PSI=(DP1+DP2+DP3+DP4+DP5+DP6+DP7)/36000000;$$

//Delta epsilon cálculo da notação oblíqua em graus:

$$D_EPSILON=(DE1+DE2+DE3+DE4+DE5+DE6+DE7)/36000000;$$

//Calcule a obliquidade elíptica média

$$U=jme/10;$$

$$E0=84381.448-4680.93*U-1.55*pow(U,2)+1999.25*pow(U,3)-51.38*pow(U,4)-249.67*pow(U,5)-39.05*pow(U,6)+7.12*pow(U,7)+27.87*pow(U,8)+5.79*pow(U,9)+2.45*pow(U,10);$$

//OBLIQUIDADE ELIPTICA VERADDEIRA.

$$E=(E0/3600)+D_EPSILON;$$

$$Erad=(E*3.1415926535898)/180;$$

```

// CORREÇÃO DA ABERRAÇÃO:

D_TAU=20.4898/(3600*R);

//Longitude aparente do Sol
Lamb=fî+D_PSI+D_EPSILON;
Lamb_rad=Lamb*3.1415926535898/180;

//Calcule o tempo sideral médio em Greenwich
Vo=280.46061837+360.98564736629*(jd-2451545)+0.000387933*pow(jc,2)-
(pow(jc,3)/38710000);

//Calcule o tempo aparente sideral em Greenwich a qualquer momento
V=Vo+-0.00399840*cos(23.44);

//Calcule a ascensão direta do Sol geocêntrico, "(em graus):
alfa1=sin(Lamb_rad)*cos(Erad)-tan(-1*DBrad)*sin(Erad);
alfa2=cos(Lamb_rad);
teste=atan2(alfa1,alfa2);
alfarad=(2*3.1415926535898)+teste;
alfa_graus=alfarad*180/3.1415926535898;

//Calcule a declinação geocêntrica do Sol, * (em graus):
Delta=asin((sin(-1*DBrad)*cos(Erad))+(cos(-1*DBrad)*sin(Erad)*sin(Lamb_rad)));
Delta_graus=Delta*180/3.1415926535898;

//Calcule o ângulo da hora local do observador, H (em graus):
PARAL=8.794/(3600*R);
H1=V+Long-alfa_graus;
H20=(H1/360);
H3=int(H1/360);
H4=H20-H3;

```

$$H=360-(360*H4);$$

$$U=\text{atan}(0.99664719*\tan(\text{Lat}));$$

//Calcule a elevação direta do Sol topocêntrico ""(em graus): "Topocêntrico" significa que a posição do Sol é calculada em relação à posição local do observador na superfície da Terra

$$\text{Csi}=8.794/(3600*R);$$

//where E is the observer elevation (in meters). Note that x equals $D * \cos n'$ where D is the observer's distance to the center of Earth, and n' is the observer's geocentric latitude.

$$\text{Termo_x}=\cos(U)+(E/6378140)*\cos(\text{Lat});$$

$$\text{Termo_y}=0.99664719*\sin(U)+(E/6378140)*\sin(\text{Lat});$$

//Calcule a paralaxe na ascensão direita do Sol,) ""(em graus),

$$D_a=-\text{Termo_x}*\sin(\text{PARAL})*\sin(H);$$

$$D_b=\cos(\text{delta})-\text{Termo_x}*\sin(\text{PARAL})*\cos(H);$$

$$D_alfa=\text{atan2}(D_a,D_b);$$

$$//\text{Alfa2}=\text{alfa}+D_alfa;$$

//Serial.print("Alfa2= ");

//Serial.println(Alfa2,8);

//Declinação Topocentrica:

$$\text{Deltaa}=\sin(\text{Delta})-\text{Termo_Y}*\sin(\text{PARAL})*\cos(D_alfa);$$

$$\text{Deltab}=\cos(\text{Delta})-\text{Termo_x}*\sin(\text{PARAL})*\cos(H);$$

$$\text{Delta_2}=\text{atan2}(\text{Deltaa},\text{Deltab});$$

//Calcule o ângulo topocêntrico da hora local, H '(em graus),

$$H2=H-D_alfa;$$

$$\text{Lat_rad}=\text{Lat}*3.1415926535898/180;$$

$$H_rad=H*3.1415926535898/180;$$

```

//Calculate the topocentric zenith angle, 2 (em grasu:
e_00=sin(Lat_rad)*sin(Delta);
e_02=cos(Lat_rad)*cos(Delta)*cos(H_rad);
e_01=e_00+e_02;
e_0=asin(e_01);
e_0_graus=e_0*180/3.1415926535898;

//perda por difração atmosférica
K1=pressao_atm/1010;
K2=283/(273+Temper_md);
K3=e_0+(10.3/(e_0+5.11));

D_E=K1*K2*(1.02/60*tan(K3));
//Serial.print("D_E= ");
//Serial.println(D_E,8);
Ang_el=e_0_graus+D_E;

Zenith=90-Ang_el;
Serial.print("Zenith= ");
Serial.println(Zenith,6);

//instrução para mostrar o ângulo zenith
Elev=90-Zenith;
Serial.print("Elevação solar= ");
Serial.println(Elev,8);

//Azimute astronomico:
Aza=sin(H_rad);
Aza1=cos(H_rad)*sin(Lat_rad)-tan(Delta)*cos(Lat_rad);
AZ_astr=atan2(Aza,Aza1);
AZ_int=int(AZ_astr);
AZ_astronomico=AZ_astr-AZ_int;

```

```

AZ_astr_graus=AZ_astronomico*180/3.1415926535898;

//instrução para mostrar o ângulo Azimute
Azimute=AZ_astr_graus+180;
Serial.print("Azimute= ");
Serial.println(Azimute,8);
//*****INÍCIO DO CÁLCULO DO ÂNGULO DE REFLEXÃO
DO(S) ESPELHO(S)- THETA_N*****
    lambda_n= atan((sin(Zenith))*(sin(Azimute)))/(cos(Zenith))// "ângulo de incidência
projetado"
    L_n=2 // "distância em metros horizontal do espelho até a base do absorvedor no caso 2 m"
    H_n=3 //"distância em metros horizontal do espelho até a base do absorvedor no caso 3 m"
    phi_n= atan(q_n/h)// "ângulo de incidência no centro do absorvedor"
    xi_n=(phi_n-lambda_n)/2 //"ângulo de reflexão do espelho"
    theta_n= phi_n-xi_n //"ângulo de mira espelho /absorvedor em graus"

//***** CONVERSÃO DO ÂNGULO FINAL EM SEQUENCIA DE PULSOS PARA
POSICIONAMENTO DO MOTOR DE PASSO*****
    N= 2000;// seleção do número de pulsos programados no driver do motor de passo.
    R=N*theta_n/360;//número de pulsos a serem enviados para o motor.

// constantes nao sao alteradas:
const int analogInPin = A8; // Entrada analogica do sensor
const int analogOutPin = 9; // Saida analogica
int sensorValue = A9; // leitura do sensor
int outputValue = A10; // leitura da saida driver analogica)
void setup()
{
    // inicializa a comunicacao serial:
    Serial.begin(9600);
}voidloop()

```

```

    {
//faz a leitura da entrada analogica:
sensorValue = analogRead(analogInPin);
// mapeia o resultado da entrada analogica dentro do intervalo de 0 a 255:
outputValue = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 255);

// muda o valor da saida analogica:
analogWrite(analogOutPin, outputValue);

// imprime o resultado no monitor serial:
Serial.print("=");
Serial.print(sensorValue);
Serial.print("\t output = ");
Serial.println(outputValue);

// Aguarda 2 milissegundos antes do proximo loop:
delay (2);
    }

//*****commando para correção do ângulo entre o valor
calculado e o retorno medido *****//

```

Instrução no módulo Arduíno para a determinação do número de pulsos enviados:

```

pinMode (10,OUTPUT);// define o pino 10 como pino de saída do Arduíno
}

```

```

void loop() { //início da instrução
    if(n<e) define como condição será enviado uma série de pulsos até o valor definido com
“e”abaixo desse valor o envio é interrompido.

```

```

    {
        digitalWrite(10,HIGH); indica que o sinal de saída no pino 10 é de nível alto (5Vdc)
        delay(5);// duração do pulso de 5 milissegundos
        digitalWrite(10,LOW);//mudo para pino em sinal baixo (0Vdc)
        delay(5); mantém um período de 5 milissegundo em nível baixo
    }

```

n++; // comando para que siga enviando os pulsos até que a condição “if” seja estabelecida.

}

void loop (){