



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SISTEMA DE ORIENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE
ESPELHOS PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

**João Vitor Lemos de Souza
Lucas Henrique Oliveira Rosas**

Brasília, dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

SISTEMA DE ORIENTAÇÃO AUTOMÁTICA DE ESPELHOS PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

João Vitor Lemos de Souza
Lucas Henrique Oliveira Rosas

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista

Banca Examinadora

Prof. Marco A. Freitas do Egito Coelho, UnB/ Dep de Engenharia Elétrica _____

Prof. João Manoel Dias Pimenta, UnB/ Dep de Engenharia Mecânica _____

Prof. Lélío Ribeiro Soares Júnior, UnB/ Dep de Engenharia Elétrica _____

Dedicatórias

*Dedico este trabalho ao meu pai, José
Martins.*

*Dedico este trabalho à minha mãe, Marta
Antônia.*

João Vitor Lemos de Souza

Lucas Henrique Oliveira Rosas

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por me dar forças para continuar mesmo diante de diversas dificuldades.

Aos meus pais, Mônica e José, pelo grande apoio em toda a minha vida.

A toda a minha família, especialmente aos meus irmãos, Júnior e Regina, pelo carinho, incentivo e atenção.

Agradeço ao meu orientador, Professor Egito, pela grande ajuda neste trabalho de conclusão de curso.

Ao Lucas Henrique, por ser a minha dupla nessa grande jornada, sempre mostrando um excelente empenho durante a realização do trabalho final.

Agradeço a minha melhor amiga, Renata Reis, por estar sempre ao meu lado durante os bons e maus momentos.

Aos meus amigos, Gustavo Henrique, Matheus Moraes, Pedro Caiafa e Rodrigo Rianelly, pelo apoio durante esses cinco anos de faculdade.

Agradeço ao meu amigo Vitor Serpa, pela sua grande ajuda nas disciplinas do curso.

João Vitor Lemos de Souza

Agradeço a Universidade de Brasília, pela oportunidade de desenvolver conhecimentos e habilidades em engenharia elétrica.

Ao meu orientador Marco Antonio Egito, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao professor Rafael Amaral Shayani, pelo auxílio e conselhos durante todo o trabalho.

A minha mãe Marta, por sempre acreditar no meu potencial.

Agradeço ao João Vitor, pelo tempo e dedicação durante esta jornada.

A empresa júnior de engenharia elétrica, ENETEC, que me proporcionou experiências únicas e transformadoras.

Lucas Henrique Oliveira Rosas

RESUMO

Estudo para verificar a possibilidade do aumento da produção de energia elétrica de módulos solares por intermédio do uso de espelhos. Para isso, confeccionou-se um protótipo, que utiliza motores de passo para movimentar espelhos, visando redirecionar, de forma controlada, os raios solares para um painel fotovoltaico. Diante disso, tem-se uma análise empírica para averiguar a eficiência do painel com o uso de espelhos.

Palavras-chave: Espelhos; módulos solares; raios solares; motor de passo.

ABSTRACT

This research presents a study to verify the possibility of increasing the production of electricity through solar modules by using mirrors. In this regard, a prototype was made, which one uses motors to move the mirrors aiming for redirect, in a controlled way, the sun's rays to a photovoltaic panel. In addition, there are an empirical analysis in order to check the efficiency of the panel using mirrors.

Keywords: Mirrors; solar modules; Sun rays; stepper motor.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1.INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO..... | 1 |
| 1.2 OBJETIVOS | 1 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TEXTO..... | 2 |
| 2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 3 |
| 2.1 RADIAÇÃO E IRRADIÂNCIA | 3 |
| 2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO E EFEITO FOTOELÉTRICO..... | 4 |
| 2.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS | 6 |
| 2.3.1 CARACTERÍSTICAS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS..... | 7 |
| 2.3.2 FATORES QUE MODIFICAM A CURVA CARACTERÍSTICA | 9 |
| 2.3.3 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS..... | 10 |
| 2.4 POSICIONAMENTO DO SOL | 11 |
| 2.5 HORA SOLAR E HORA CIVIL | 13 |
| 2.6 ESTRUTURAS PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS..... | 14 |
| 2.6.1 ESTRUTURA FIXA | 14 |
| 2.6.2 SEGUIDOR SOLAR DE UM EIXO..... | 14 |
| 2.6.3 SEGUIDOR SOLAR DE DOIS EIXOS | 15 |
| 2.7 USO DE ESPELHOS | 15 |
| 2.7.1 LEIS DA REFLEXÃO | 17 |
| 2.7.2 ESPELHO PLANO | 18 |
| 3.IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA | 20 |
| 3.1 INTRODUÇÃO..... | 20 |
| 3.2 SOLUÇÃO PROPOSTA..... | 20 |
| 3.3 MODELAGEM DO SISTEMA | 21 |
| 3.4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO | 29 |
| 3.4.1 CÓDIGO..... | 38 |
| 4.RESULTADOS E ANÁLISE..... | 40 |
| 4.1 INTRODUÇÃO..... | 40 |
| 4.2 DIA 1 | 41 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 4.3 | DIA 2 | 43 |
| 4.4 | DIA 3 | 46 |
| 4.5 | DIA 4 | 48 |
| 4.6 | ANÁLISE ENTRE DIAS | 51 |
| 4.6.1 | ANÁLISE DE RENDIMENTO | 51 |
| 4.6.2 | ANÁLISE DE CORRENTE..... | 52 |
| 4.6.3 | ANÁLISE DE TEMPERATURA | 53 |
| 5.CONCLUSÃO..... | | 55 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 57 |
| ANEXO I..... | | 59 |
| | CÓDIGO PARA A IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA COM ESPELHOS..... | 59 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Influência da massa de ar e do comprimento de onda na irradiância espectral da luz solar. | 4 |
| Figura 2.2– Ilustração efeito fotovoltaico..... | 5 |
| Figura 2.3 – Ilustração do efeito fotoelétrico. | 5 |
| Figura 2.4 – Composição das células solares. | 6 |
| Figura 2.5 – Circuito equivalente básico para uma célula fotovoltaica..... | 7 |
| Figura 2.6 - Curva I-V de uma célula solar para uma dada incidência solar e temperatura..... | 8 |
| Figura 2.7 – Influência da irradiância incidente solar da célula fotovoltaica na curva I-V..... | 9 |
| Figura 2.8 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V..... | 9 |
| Figura 2.9 – Tipos de células solares..... | 10 |
| Figura 2.10 – Declinação solar..... | 11 |
| Figura 2.11- Ilustração dos ângulos de zênite (θ_z), azimute solar (γ_s) e elevação solar (α). ... | 12 |
| Figura 2.12– Seguidor solar de um eixo..... | 14 |
| Figura 2.13 – Seguidor solar de dois eixos..... | 15 |
| Figura 2.14 – Concentração solar em “V”..... | 16 |
| Figura 2.15 – Módulo solar com espelho acoplado..... | 16 |
| Figura 2.16 – Primeira Lei da Reflexão. | 17 |
| Figura 2.17 – Segunda Lei da Reflexão. | 18 |
| Figura 2.18 – Reflexão regular da luz em um espelho plano. | 18 |
| Figura 2.19 – Reflexão difusa. | 19 |
| Figura 3.1 – Posicionamento dos espelhos durante o início da manhã. | 21 |
| Figura 3.2 – Posicionamento dos espelhos durante o final da tarde..... | 21 |
| Figura 3.3 – Ângulo de reflexão (x) para o Espelho 1 posicionado a 90° em relação a base do sistema. | 22 |
| Figura 3.4 – Ângulo de incidência (y) de reflexão (x) para o Espelho 1 posicionado a 90° em | |

| | |
|--|----|
| relação a base do sistema..... | 23 |
| Figura 3.5 – Ângulo de deslocamento (L) em relação a normal da base do Espelho 1 para ele acompanhar o Sol. | 26 |
| Figura 3.6 – Deslocamento do Espelho 1 de 15° para acompanhar o movimento aparente do Sol ao longo de uma hora. | 26 |
| Figura 3.7 – Distância (Dn) da conexão entre o espelho e o motor de passo por meio do fio de nylon. | 27 |
| Figura 3.8 – Distância (D0) do topo do Espelho 1 e o eixo do motor. | 27 |
| Figura 3.9 – Placa Arduino Uno. | 30 |
| Figura 3.10 - Painel solar de 2,5 W. | 31 |
| Figura 3.11 - Módulo de tempo real - RTC DS1307. | 32 |
| Figura 3.12 - Sensor de Temperatura - LM35DZ. | 33 |
| Figura 3.13 - Motor de Passo - 28BYJ-48. | 33 |
| Figura 3.14 - Driver de motor de passo – ULN2003. | 33 |
| Figura 3.15 - Fonte de 5 V. | 34 |
| Figura 3.16 – Circuito de captação de dados. | 35 |
| Figura 3.17 – Circuito com resistor escolhido. | 35 |
| Figura 3.18 – Espelho 250 mm por 180 mm. | 36 |
| Figura 3.19 – Esquemático do circuito. | 37 |
| Figura 3.20 – Visão frontal da estrutura física. | 37 |
| Figura 3.21 – Visão superior da estrutura física. | 38 |
| Figura 3.22 – Visão superior lateral da estrutura física. | 38 |
| Figura 3.23 – Fluxograma representativo do programa criado. | 39 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1 – Rendimentos para o dia 1. | 42 |
| Tabela 4.2 – Temperaturas e correntes para o dia 1. | 43 |
| Tabela 4.3 – Rendimentos para o dia 2. | 44 |
| Tabela 4.4 – Temperaturas e correntes para o dia 2. | 45 |
| Tabela 4.5 – Rendimentos para o dia 3. | 47 |
| Tabela 4.6 – Temperaturas e correntes para o dia 3. | 48 |
| Tabela 4.7 – Rendimentos para o dia 4. | 49 |
| Tabela 4.8 – Temperaturas e correntes para o dia 4. | 50 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 4.1 – Corrente em função do horário para o dia 1..... | 41 |
| Gráfico 4.2 – Temperatura em função do horário para o dia 1. | 42 |
| Gráfico 4.3 – Corrente em função do horário para o dia 2..... | 43 |
| Gráfico 4.4 – Temperatura em função do horário para o dia 2. | 45 |
| Gráfico 4.5 – Corrente em função do horário para o dia 3..... | 46 |
| Gráfico 4.6 – Temperatura em função do horário para o dia 3. | 47 |
| Gráfico 4.7 – Corrente em função do horário para o dia 4..... | 48 |
| Gráfico 4.8 – Temperatura em função do horário para o dia 4. | 50 |
| Gráfico 4.9 – Rendimentos de cada dia em função do horário..... | 51 |
| Gráfico 4.10 – Correntes máximas para cada dia..... | 52 |
| Gráfico 4.11 – Temperaturas máximas para cada dia. | 53 |
| Gráfico 4.12 - Temperaturas médias para cada dia. | 54 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|--------|--|
| A | Ampere |
| AM | Massa de ar |
| B | Centro do Espelho 1 do protótipo |
| C | Coulomb |
| cm | centímetros |
| CPV | <i>Concentrated Photovoltaics</i> |
| C++ | Linguagem de programação |
| D | Diodo |
| Dn | Distância da conexão entre o Espelho 1 e o motor de passo |
| E | Equação do Tempo |
| EEPROM | <i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> |
| Eg | Energia de uma onda |
| f | Frequência de uma onda |
| G | Comprimento do eixo do motor de passo |
| h | Constante de Plank |
| H | Altura entre o topo do Espelho 1 e a base do sistema do protótipo |
| Hs | Hora Solar |
| I | Raio de incidência |
| IDE | <i>Integrated development environment</i> |
| IL | Fonte de corrente |
| I0 | Corrente de saturação reversa do diodo |
| J/K | Joule por Kelvin |
| J | Distância horizontal entre o topo Espelho 1 e o eixo do motor de passo |
| k | Constante de Boltzman |

| | |
|------------------|---|
| K | Kelvin |
| L | Ângulo de deslocamento do Espelho 1 |
| Loc | Longitude local |
| Lst | Longitude padrão do fuso |
| M | Ângulo formado entre o Espelho 1 e a base do sistema do protótipo |
| mA | Miliampere |
| mm | milímetros |
| n | Dia juliano |
| N | Normal da superfície refletora |
| O | Número de Voltas dadas pelo motor de passo |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| q | carga do elétron |
| Q | Distância horizontal entre o topo do Espelho 1 e o suporte do espelho |
| R | Raio Refletido |
| Rp | Resistência em paralelo |
| Rs | Resistência em série |
| RTC | <i>Real Time Clock</i> |
| S | Constante Solar |
| T | Temperatura absoluta |
| u | fator de idealidade do diodo |
| V | Volt |
| w | Ângulo horário |
| W/m ² | Watt por metro ao quadrado |
| x | Ângulo de reflexão do Espelho 1 posicionado a 90° |
| y | Ângulo de incidência do Espelho 1 posicionado a 90° |
| Z | Centro da placa solar do protótipo |

| | |
|--------------------|--------------------------|
| α | Ângulo de elevação solar |
| δ | Declinação solar |
| γ_s | Ângulo de azimutal |
| θ_z | Ângulo zenital |
| ϕ | Latitude local |
| Ω | Ohm |
| $^{\circ}\text{C}$ | Graus Celsius |
| \hat{i} | Ângulo de incidência |
| \hat{r} | Ângulo de reflexão |

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo trata da motivação e do objetivo para a construção do protótipo com espelhos para refletir raios solares em uma placa fotovoltaica. Tem-se também, a estruturação do texto que formaliza a confecção do sistema.

1.1 MOTIVAÇÃO

No atual cenário do meio-técnico-científico-informacional, o uso de energia solar fotovoltaica vem sendo cada vez mais difundida. Devido às suas vantagens, percebe-se um aumento significativo de instalações de painéis solares em residências para suprir as necessidades de energia elétrica.

Apesar do uso de energia solar apresentar diversas vantagens, tais como a ausência de poluição do ambiente, e uma baixa necessidade de manutenção, os módulos fotovoltaicos apresentam, de modo geral, uma baixa taxa de conversão da energia solar em energia elétrica. Portanto, visando aumentar a produção de energia elétrica mediante placas solares, tem-se a principal motivação para este projeto.

Procurando aliar a área de controle dinâmico com energia renovável, tem-se o encorajamento de criar um sistema de automação de espelhos visando otimizar a produção de energia elétrica, por meio de reflexão dos raios solares, das placas fotovoltaicas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é fazer uma análise empírica para verificar a viabilidade do uso de espelhos planos na otimização da produção de energia elétrica mediante placas solares. Tem-se o intuito de desenvolver um protótipo de automação de espelhos para refletir raios solares em módulos fotovoltaicos. Além disso, há a finalidade de comparar os dados obtidos do sistema com espelhos para com um sistema sem espelhos.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho é composto por cinco capítulos: o primeiro refere-se à introdução; o segundo à fundamentação teórica; o terceiro à modelagem e à implementação do sistema proposto; o quarto trata dos resultados adquiridos, bem como da análise desses dados; por fim, tem-se a conclusão.

A introdução aborda a motivação e o objetivo para a criação do protótipo proposto. O segundo capítulo trata do conhecimento teórico necessário para se ter um embasamento a respeito da metodologia utilizada durante o projeto.

O terceiro capítulo aborda toda a modelagem matemática utilizada para a construção do protótipo, bem como a forma de implementação do sistema mediante Arduino, motores de passo entre outros componentes eletrônicos.

O quarto capítulo mostra os resultados obtidos com a placa sem os espelhos e com a placa com os espelhos, além disso, tem-se uma comparação entre esses dados. O quinto e último capítulo consiste nas considerações finais, mostrando os resultados de forma concisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda o conteúdo usado para o embasamento teórico para a realização do projeto proposto.

2.1 RADIAÇÃO E IRRADIÂNCIA

A energia do Sol é transmitida até a Terra por meio de radiação eletromagnética. Essa radiação é composta por ondas de diferentes frequências, em que, quanto maior for a frequência, maior será a energia transmitida pela onda, o que pode ser observado pela Equação 2.1 mostrada a seguir:

$$Eg = f \times h \quad (2.1)$$

Sendo, Eg a energia da onda dada em Elétrons-Volt, f a frequência em Hertz e h a constante de Planck.

A radiação emitida pelo Sol que alcança a atmosfera da Terra constitui a radiação incidente. A radiação incidente na atmosfera terrestre é relativamente constante, porém a disponibilidade de radiação solar na superfície da terra depende da latitude local e da posição no tempo (hora e dia do ano). Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente, caracterizado pelo movimento de rotação, e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol, a translação.

A incidência total da radiação solar sobre um corpo localizado no solo é a soma das componentes direta, difusa e refletida, sendo a radiação direta a que não sofreu nenhuma mudança de direção além da provocada pela refração atmosférica, a radiação difusa aquela recebida por um corpo após a direção dos raios solares ter sido modificada por reflexão ou espalhamento na atmosfera e, por fim, a radiação refletida, que depende das características do solo e da inclinação do corpo em que esta incide.

A massa de ar (AM) é definida como a razão entre o caminho óptico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na direção do zênite ao nível do mar. Quanto maior for o ângulo incidente dos raios solares ao plano normal na superfície da terra, maior será a massa de ar, afetando a radiação solar por efeitos de absorção e espalhamento.

A irradiância é caracterizada como sendo a densidade de energia solar incidente por unidade de tempo em uma dada área. Conforme [1], “A irradiância média gerada pelo Sol corresponde a 1.367 W/m^2 , denominada como constante solar (S), definida como a irradiância sobre uma superfície normal aos raios solares, à distância média Terra-Sol, na ausência de atmosfera”. No entanto, na superfície terrestre a irradiância da luz solar, devido à massa de ar, é tipicamente 1.000 W/m^2 . Na Figura 2.1, tem-se a ilustração da influência da massa de ar (AM) e do comprimento de onda na irradiância solar.

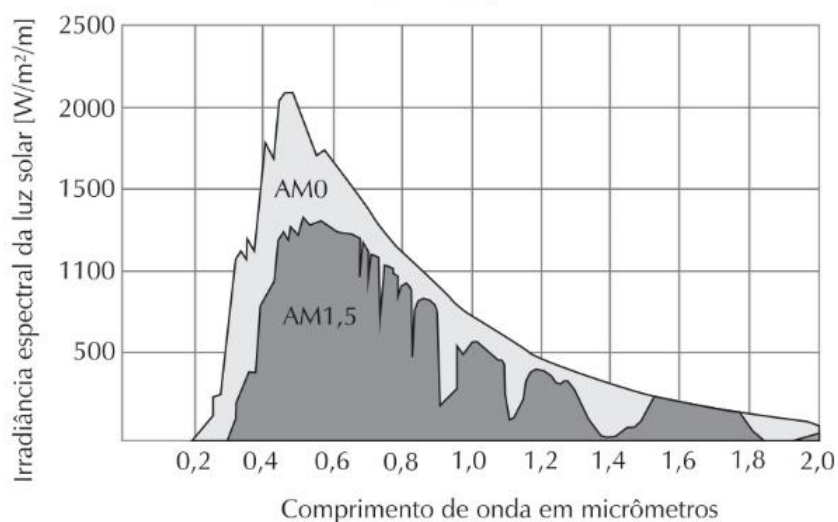


Figura 2.1 - Influência da massa de ar e do comprimento de onda na irradiância espectral da luz solar. Fonte: [1].

2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO E EFEITO FOTOELÉTRICO

O efeito fotovoltaico, Figura 2.2, ocorre quando há excitação dos elétrons de alguns tipos de materiais na presença da luz [2]. Quando ondas eletromagnéticas incidem sobre um corpo que tem a capacidade de absorver radiação, a energia que tais ondas carregam são transmitidas para as moléculas deste corpo, transformando energia eletromagnética em energia cinética. O efeito fotovoltaico consiste na transformação de radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica por meio da criação de uma diferença de potencial formada por materiais semicondutores. Ele surgiu a partir do desenvolvimento da teoria da mecânica quântica, que não será objeto de estudo do presente trabalho.

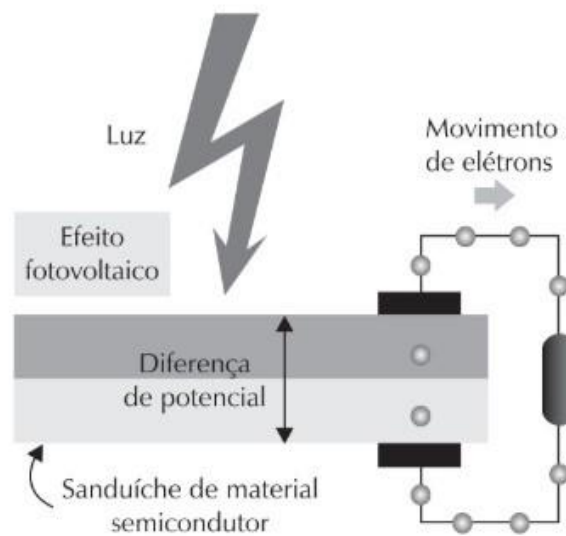


Figura 2.2– Ilustração efeito fotovoltaico. Fonte: [1].

Diferentemente, o efeito fotoelétrico, Figura 2.3, descreve a remoção de elétrons de materiais metálicos e não metálicos sólidos, líquidos ou gasosos pela incidência de radiação. A energia da radiação da luz está concentrada em pacotes de energia discretos, chamados de fótons, onde a frequência destes define a quantidade de elétrons que serão removidos do material exposto à radiação.

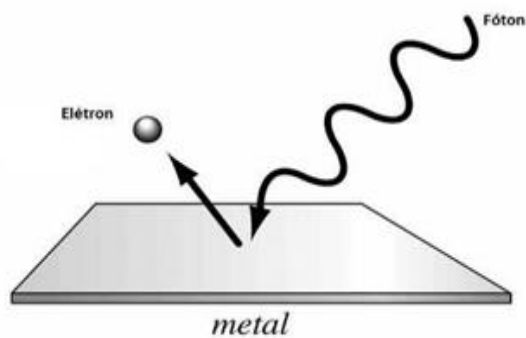


Figura 2.3 – Ilustração do efeito fotoelétrico. Fonte: [3].

Embora o efeito fotoelétrico e o efeito fotovoltaico tenham embasamentos físicos semelhantes, o efeito fotovoltaico relata, exclusivamente, a conversão direta da radiação solar em corrente elétrica contínua [4].

2.3 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico). A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão. O desenvolvimento da tecnologia apoiou-se inicialmente na busca, por empresas do setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a “corrida espacial”. A célula solar era, e continua sendo, o meio mais adequado para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência no espaço, tendo uma relação de energia por unidade de peso vantajosa.

As células solares são compostas por duas camadas de material semicondutor P e N, uma grade de coletores metálicos e uma base metálica. O semicondutor é um material que não pode ser classificado como condutor elétrico nem como isolante. Suas propriedades podem ser modificadas pela adição de matérias dopantes ou impurezas, em que o material do tipo N possui um excedente de elétrons, enquanto o material tipo P apresenta falta de elétrons.

A grade e a base metálica são os terminais elétricos que fazem a coleta da corrente elétrica produzida pela incidência de fótons. Os contatos elétricos são construídos na forma de uma fina grade metálica impressa na célula. As camadas semicondutoras da célula podem ser fabricadas com diferentes materiais, sendo o mais comum o silício.

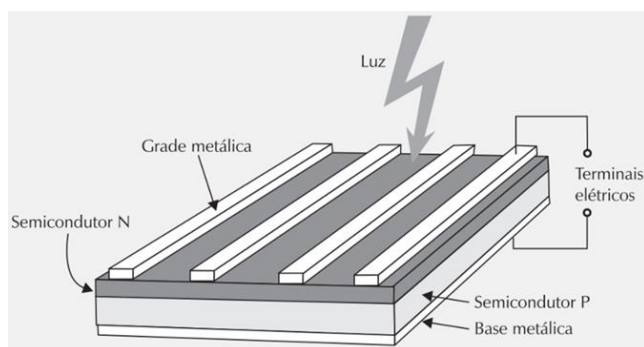


Figura 2.4 – Composição das células solares. Fonte: [1].

Quando duas camadas de materiais P e N são colocadas em contato, formando o que se chama junção semicondutora, os elétrons da camada N migram para a camada P e ocupam os “espaços vazios”, as lacunas. A camada superior de material N de uma célula fotovoltaica é tão fina que a luz pode penetrar nesse material e transferir sua energia sobre os elétrons do material, fazendo com que eles tenham energia suficiente para vencer a barreira potencial e se

movam da camada N para a camada P.

Os elétrons em movimento são coletados pelos eletrodos metálicos, onde estes irão circular por um circuito fechado em direção aos eletrodos da camada N, gerando corrente elétrica.

2.3.1 CARACTERÍSTICAS DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

O circuito elétrico equivalente de uma célula solar, mostrado na Figura 2.5, é formado pela conexão em paralelo de uma fonte de corrente (I_L) com um diodo (D). Além disso, tem-se as resistências em série (R_s), devido às regiões dopadas, e em paralelo (R_p), devido a pontos de curto circuito na região pn [5].

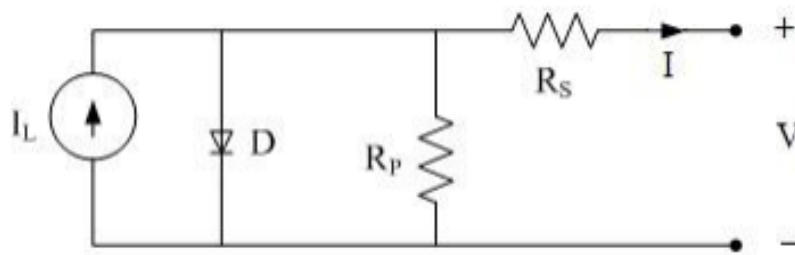


Figura 2.5 – Circuito equivalente básico para uma célula fotovoltaica. Fonte: [5].

Dessa forma, considerando o modelo elétrico da figura acima, a curva característica, dada pela corrente em função da tensão (I-V), de uma célula fotovoltaica é determinada pela Expressão 2.2 [5]:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{ukT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.2)$$

Em que:

- I_L – corrente fotogerada (A);
- I_0 – corrente de saturação reversa do diodo (A);
- u – fator de idealidade do diodo;
- q – carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$);
- k - constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$);
- T – temperatura absoluta (K);
- R_s - resistência em série (Ω);

- R_p – resistência em paralelo (Ω).

A Figura 2.6 ilustra uma curva característica comum de uma célula fotovoltaica. Esta curva é obtida mediante os padrões de testes que são definidos pelos valores de 1.000 W/m^2 de irradiância, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura da célula e coeficiente de massa de ar de 1,5.



Figura 2.6 - Curva I-V de uma célula solar para uma dada incidência solar e temperatura. Fonte: [1].

O ponto de operação da célula depende do que está conectado a ela. Nos limites de operação temos o ponto de máxima corrente e o ponto de máxima tensão. O ponto de máxima corrente ocorre quando se colocam os terminais do módulo iluminado em curto circuito. Nessa condição, a tensão elétrica é nula. O ponto de máxima tensão ocorre quando deixamos em aberto os terminais do módulo iluminado e, nessa condição, a corrente é nula.

O ponto de máxima potência é o ponto em que os valores de corrente e tensão maximizam o valor da potência fornecida pelo módulo. Esse é o ponto de operação ideal para o melhor aproveitamento de energia que o módulo pode gerar.

Com o aumento da carga conectada ao módulo, saindo da situação de curto-circuito, a corrente diminui levemente até o ponto de máxima potência, onde a partir desse ponto, aumentos de carga resultam em uma grande diminuição da corrente gerada, chegando até o ponto de corrente zero e tensão máxima.

2.3.2 FATORES QUE MODIFICAM A CURVA CARACTERÍSTICA

De acordo com [5], “O desempenho das células fotovoltaicas é influenciado pela irradiância incidente e sua distribuição espectral bem como pela temperatura de operação da célula [...]”.

Caso mantida a mesma temperatura, a corrente elétrica da célula solar e a irradiância incidente são diretamente proporcionais, Figura 2.7. Além disso, com o aumento da irradiância, a tensão de circuito aberto aumenta de maneira logarítmica [5].

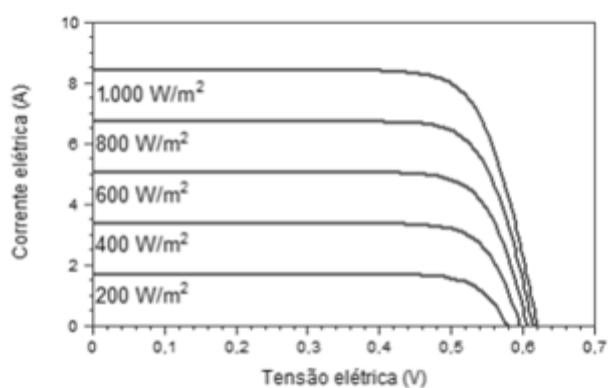


Figura 2.7 – Influência da irradiância incidente solar da célula fotovoltaica na curva I-V. Fonte: [5].

Para que haja o aumento da temperatura da célula é necessário ter-se uma elevação da irradiância e/ou da temperatura ambiente, quando uma dessas duas situações acontece, tem-se a provável redução do rendimento da célula [5]. Na Figura 2.8 é possível observar as curvas características de uma célula fotovoltaica, de acordo com a variação da temperatura da célula. Nota-se a que o aumento da temperatura proporciona a redução da tensão da célula fotovoltaica, o que justifica a diminuição da eficiência.

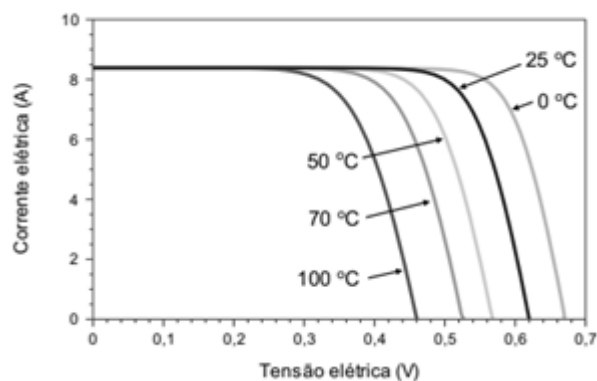


Figura 2.8 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V. Fonte: [5].

2.3.3 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As tecnologias de produção de células solares podem ser divididas entre células de silício, produzidas por *wafers*, e células de filme fino, produzidas com tecnologias a vácuo. As tecnologias de células fotovoltaicas mais comuns encontradas no mercado são a do silício monocristalino, policristalino e amorfo, Figura 2.9.

O silício monocristalino tem uma estrutura atômica ordenada que torna o material o mais eficiente dos citados, com uma eficiência entre 15% a 18% [1]. Seu processo de fabricação é lento e mais caro que em outras tecnologias, onde as células são formadas em fatias de um único grande cristal.

O silício policristalino tem uma estrutura molecular menos ordenada, onde são formados vários pequenos cristais em um único bloco de material. Este é mais barato de se produzir em relação ao silício monocristalino, porém a presença de interfaces entre os vários cristais reduz a eficiência de células desse tipo, sendo esta de 13% a 15% [1]. Ligeiramente inferior às das células monocristalinas.

As células compostas por silício amorfo têm eficiência menor em comparação a dos dispositivos cristalinos, chegando a eficiência de 5% a 8% [1]. Esta tecnologia é uma das mais baratas para fabricação, onde sua estrutura não segue um padrão ordenado como visto nas estruturas cristalinas.

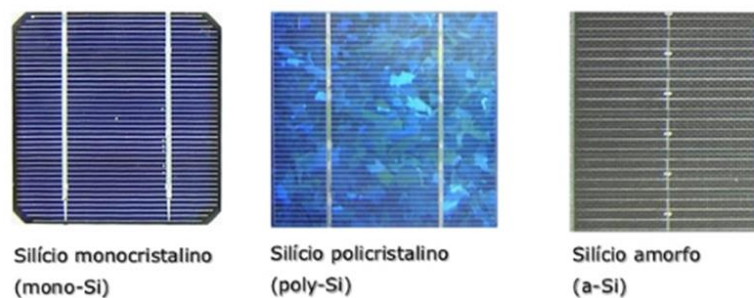


Figura 2.9 – Tipos de células solares. Fonte: [1].

O módulo fotovoltaico é composto por várias células montadas sobre uma estrutura rígida. A tensão gerada pelo módulo, para uma dada irradiância solar incidente, depende do número de células e do tipo de tecnologia empregada em sua fabricação (monocristalino ou policristalino, por exemplo).

2.4 POSICIONAMENTO DO SOL

Os movimentos de rotação e de translação executados pela Terra interferem diretamente nas incidências direta dos raios solares sobre as placas fotovoltaicas.

Diante disso, torna-se necessário compreender o posicionamento do Sol ao longo do dia e do ano, de modo a ter-se uma instalação de painéis solares na qual melhor otimiza a produção de energia elétrica.

Existem diversos ângulos para descrever as relações geométricas entre os raios solares. Dentre vários, os principais são: a declinação solar; o ângulo zenital; o azimute solar; a elevação solar; e o ângulo horário.

A declinação solar (δ), Figura 2.10, é dada pelo ângulo entre a linha do Equador e a reta que liga o centro da Terra ao centro do Sol. Ela pode ser expressa pela Equação 2.3:

$$\text{sen}(\delta) = -\text{sen}(23,45) \cdot \cos\left(\frac{360 \times (n + 10)}{365,25}\right) \quad (2.3)$$

Em que, n representa os dias julianos, ou seja, n igual a 1 corresponde ao dia 1 de janeiro, já para o n igual a 32 indica o dia 1 de fevereiro e assim por diante. A declinação solar pode ser melhor observada pela imagem abaixo.

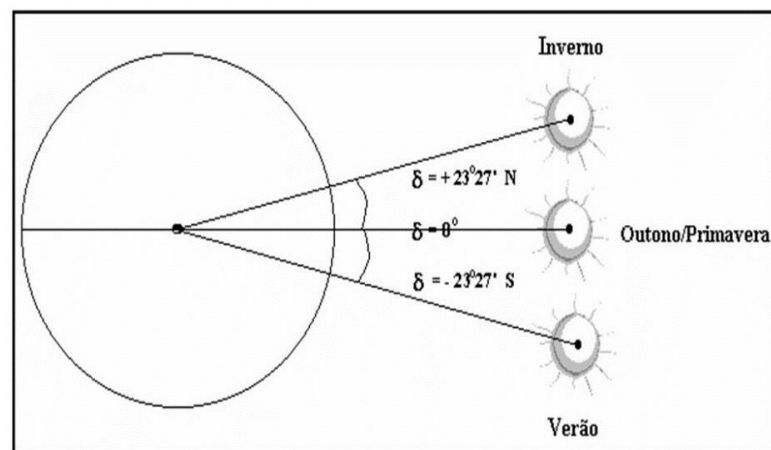


Figura 2.10 – Declinação solar. Fonte: [1].

O ângulo horário (w) pode ser definido como sendo o deslocamento angular Leste-Oeste do meridiano do Sol mediante a movimento de rotação da Terra [5]. Pode-se expressar o ângulo horário por meio da Equação 2.4:

$$w = (H_s - 12) \times 15^\circ \quad (2.4)$$

Sendo H_s a hora solar que varia entre 0h a 24h. Percebe-se, portanto, que a cada hora solar (H_s) tem-se um deslocamento de 15°

O ângulo zenital (θ_z), expresso pela Equação 2.5, é formado pela linha vertical do local com os raios solares, Figura 2.11.

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos w \cdot \cos \phi + \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \quad (2.5)$$

Em que, w é o ângulo horário, δ a declinação solar e ϕ a latitude da localidade. O ângulo de elevação solar (α) é o ângulo complementar ao ângulo zenital.

O ângulo de azimute solar (γ_s), Figura 2.11, é o ângulo formado pela direção Norte-Sul e a projeção dos raios do Sol no plano horizontal. Tendo valores positivos para quando a projeção solar se encontra a Leste e valor nulo quando a projeção está no norte geográfico [5].

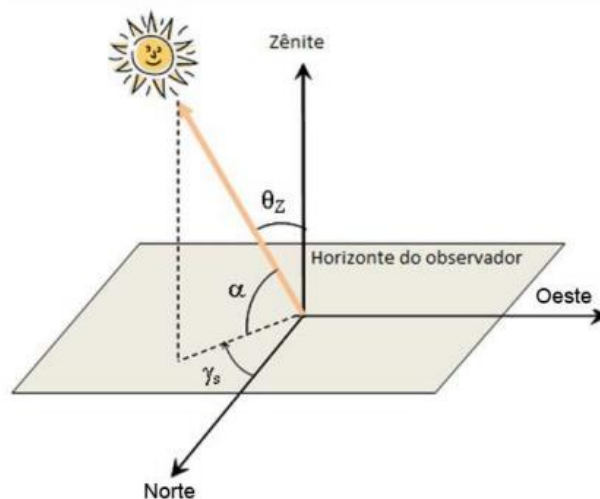


Figura 2.11- Ilustração dos ângulos de zênite (θ_z), azimute solar (γ_s) e elevação solar (α). Fonte: [5].

Mediante a Equação 2.5 é possível determinar o ângulo horário do pôr-do-sol. Basta fazer θ_z igual a 90° . Ao fazer isso tem-se que o ângulo de elevação do Sol é zero, portanto, nesse momento o Sol encontra-se na linha do horizonte do observador. Isso ocorre em dois momentos do dia, ao nascer do Sol e ao pôr-do-sol. Dessa forma, quando θ_z é 90° tem-se:

$$\cos 90^\circ = \cos \delta \cdot \cos w \cdot \cos \phi + \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \quad (2.6)$$

logo,

$$0 = \cos\delta \cdot \cos w \cdot \cos\phi + \sin\delta \cdot \sin\phi \quad (2.7)$$

isolando o w obtém-se:

$$w = \cos^{-1}\left(-\frac{\sin\delta \cdot \sin\phi}{\cos\delta \cdot \cos\phi}\right) = \cos^{-1}(-tg\delta \cdot tg\phi) \quad (2.8)$$

Nesse caso, w é o ângulo horário do pôr-do-sol, assim -w corresponde ao valor teórico do ângulo horário do nascer do Sol. Para encontrar a hora solar (Hs) do nascer ou pôr-do-sol basta utilizar os valores encontrados do ângulo horário, para θz igual a 90° e aplicar a Equação 2.4.

2.5 HORA SOLAR E HORA CIVIL

O ângulo horário é calculado mediante a hora solar. Esta, por sua vez, é diferente da hora civil mostrada nos relógios [5]. Tem-se uma pequena diferença de minutos entre a hora solar e a hora civil. Essa diferença varia ao longo do ano e pode ser expressa pela Equação 2.9:

$$\text{Hora solar} - \text{Hora oficial} = 4(Lst - Lloc) + E \quad (2.9)$$

Em que, Lst, Loc e E correspondem respectivamente a longitude padrão do fuso, a longitude local e o resultado da Equação do Tempo. A longitude padrão do fuso é dado pelo valor do meridiano central, sendo sempre um múltiplo de 15° . Ele assume valores negativos para quando o observador se encontra a Oeste do meridiano. A Equação do Tempo, expressa pela Equação 2.10, faz a correção da excentricidade da órbita da Terra e da inclinação do eixo da Terra com relação ao plano da sua órbita. Vale ressaltar que ela fornece um valor em minutos [5].

$$E = (0,000075 + 0,00186\cos\Omega - 0,032077\sin\Omega - 0,0146115 \cos(2\Omega) - 0,04089\sin(2\Omega)) \times 229,18 \quad (2.10)$$

Onde,

$$\Omega = 2\pi(n - 1) \div 365 \quad (2.11)$$

Sendo n os dias julianos.

2.6 ESTRUTURAS PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Existem diversas estruturas metálicas para posicionar os painéis solares. As principais formas de fixação são as estruturas fixas, seguidor de um eixo horizontal e o seguidor de dois eixos. Cada método de posicionar os módulos solares proporcionam vantagens e desvantagens.

2.6.1 ESTRUTURA FIXA

A estrutura fixa é a mais utilizada no cenário atual. Essa tem como vantagem o baixo custo de implementação e de manutenção. A estrutura metálica fixa é posicionada de modo a otimizar a produção de energia elétrica, fixando-se o módulo solar da maneira mais adequada em busca do melhor ângulo de zênite e de azimute. Apesar do baixo custo, o método de implementação possui uma grande desvantagem, pois, devido a variação dos ângulos de incidência solar, as placas fotovoltaicas quase sempre não atuam em seu rendimento máximo.

2.6.2 SEGUIDOR SOLAR DE UM EIXO

Devido ao movimento de rotação da Terra, o Sol, no decorrer do dia, varia a sua incidência solar do Leste para Oeste, esse movimento afeta o rendimento das placas solares conectadas nas estruturas metálicas fixas. Diante disso, visando otimizar a produção de energia elétrica, faz-se o uso do rastreamento solar de um eixo, Figura 2.12. Esse método permite a orientação dos módulos solares de modo a aumentar a absorção da irradiação solar. As placas solares seguem a movimentação do Sol.

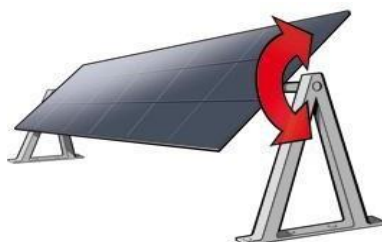


Figura 2.12– Seguidor solar de um eixo. Fonte: [6].

Conforme [7], “[...] o ganho real máximo teórico da utilização de um rastreador de um

eixo em Brasília é de 48% [...]”. Dessa forma, se comparado com a estrutura fixa, o seguidor solar de um eixo apresenta, em condições de céu claro, um maior rendimento. Essa estrutura, apesar de apresentar um aumento na produção de energia elétrica, necessita de maior manutenção, devido aos motores presentes no sistema de rastreamento.

2.6.3 SEGUIDOR SOLAR DE DOIS EIXOS

A estrutura seguidora de dois eixos, também conhecida como *solar tracking*, é a que permite o maior rendimento dos módulos solares. Ela promove a melhor orientação das células fotovoltaicas, variando-se os ângulos de zênite e de azimute, possuindo, portanto, uma incidência sempre perpendicular dos raios solares sobre as placas.



Figura 2.13 – Seguidor solar de dois eixos. Fonte: [6].

Dessa forma tem-se o maior rendimento possível dos módulos. No entanto, devido à movimentação dos dois eixos, torna-se necessário o uso de dois motores, o que aumenta ainda mais o preço da implementação e da manutenção. Diante disso, é significativo ressaltar a importância de estudo para verificar qual tipo de estrutura melhor se adapta à localidade.

2.7 USO DE ESPELHOS

Existem diversas tecnologias que utilizam a radiação refletida de espelhos para gerar energia elétrica. Muitas delas, como por exemplo as torres solares, usam o calor captado para gerar vapor e assim acionar turbinas. Além disso, é possível utilizar espelhos para redirecionar

raios solares para módulos fotovoltaicos. Esse método, conhecido como *Concentrated Photovoltaics* (CPV), pode proporcionar um maior rendimento das placas solares, podendo, portanto, aumentar a produção de energia elétrica.

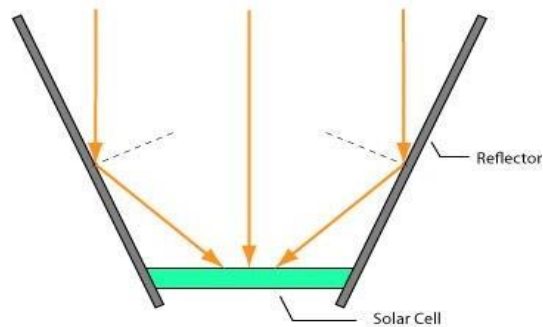


Figura 2.14 – Concentração solar em “V”. Fonte: [8].

A *Concentrated Photovoltaics* pode desencadear o uso de células solares mais eficientes, tendo em vista que, essa tecnologia aumenta a irradiância solar nos módulos fotovoltaicos. A CPV pode ser feita mediante espelhos planos, côncavos e pelas lentes de Fresnel. No entanto, o foco desse estudo consiste na concentração solar por meio de espelhos planos. Dá-se ênfase na concentração solar em forma de “V”, Figura 2.14, que se caracteriza pelo uso de dois espelhos planos, que, quando colocados perto do módulo fotovoltaico, se assemelham a letra v do alfabeto.

De acordo com [9], verificou-se que a utilização de um espelho plano para otimizar a produção de energia elétrica por parte das placas solares, Figura 2.15, aumentou o rendimento do módulo em 7% em relação a uma placa sem espelho.



Figura 2.15 – Módulo solar com espelho acoplado. Fonte: [9].

Esse valor de 7%, se comparado ao 48% do seguidor solar de um eixo, é relativamente baixo. Isso se deve ao fato da redução da eficiência dos módulos com o aumento da temperatura das células, e, além disso, nos testes realizados em [9] foram utilizadas placas comuns com eficiência em torno de 10%.

Portanto, para compreender melhor a concentração solar por meio de espelhos planos, torna-se necessário entender as leis da reflexão, bem como os espelhos planos.

2.7.1 LEIS DA REFLEXÃO

A reflexão da luz é um fenômeno óptico que acontece quando se tem uma mudança da direção dos raios luminosos ao serem incididos em uma superfície refletora. Tem-se apenas uma exceção que ocorre quando o ângulo de incidência é de 90° . Para essa situação apenas o sentido de propagação se altera [10].

A reflexão é regida por duas leis: a primeira lei afirma que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão; a segunda lei constata que o raio incidente, a normal da superfície refletora e o raio refletido estão no mesmo plano.

A Figura 2.16 ilustra a primeira lei da reflexão. O ângulo \hat{i} corresponde ao ângulo de incidência. Ele é determinado pelo ângulo formado entre o raio de incidência e a reta normal da superfície. O ângulo \hat{r} é o ângulo de reflexão. Este representa o ângulo formado entre o raio refletido e normal. Diante disso, percebe-se que:

$$\hat{i} = \hat{r} \quad (2.12)$$

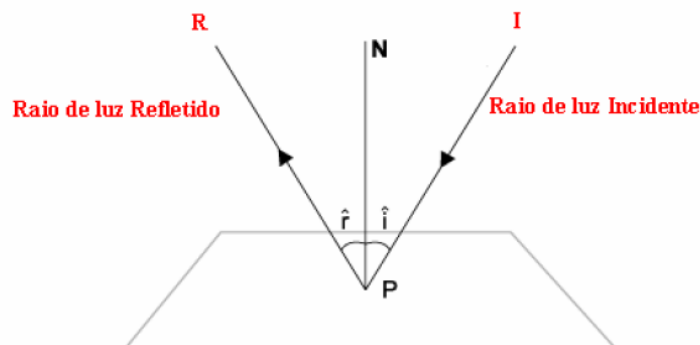


Figura 2.16 – Primeira Lei da Reflexão. Fonte: [10].

A Figura 2.17 representa a segunda lei da reflexão. As retas I, R e N são

respectivamente o raio de incidência, o raio refletido e a normal da superfície refletora. Além disso, tem-se a ilustração dos planos de incidência e de reflexão, que de acordo com a segunda lei da reflexão são iguais.

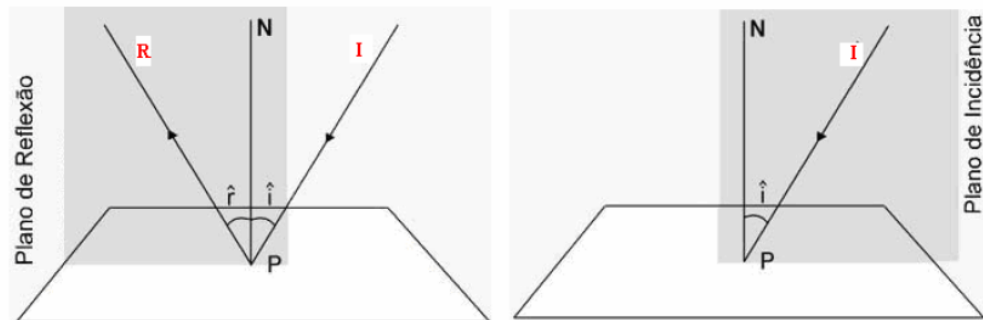


Figura 2.17 – Segunda Lei da Reflexão. Fonte: [10].

2.7.2 ESPELHO PLANO

Espelhos planos são superfícies aplanadas e polidas que possuem a capacidade de refletir os raios de luz incidentes [10].

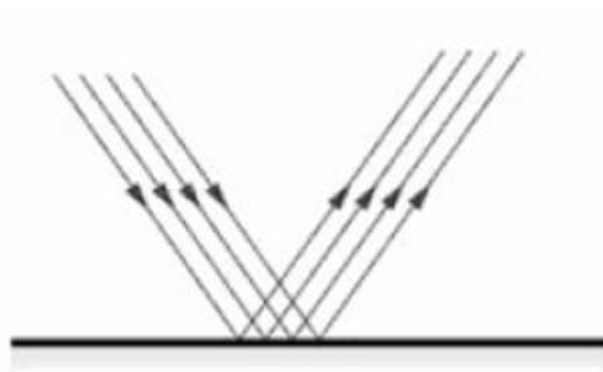


Figura 2.18 – Reflexão regular da luz em um espelho plano. Fonte: [10].

Não se pode considerar com os espelhos planos, superfícies reflexivas aplanadas irregulares. Essas promovem a reflexão difusa da luz [10].

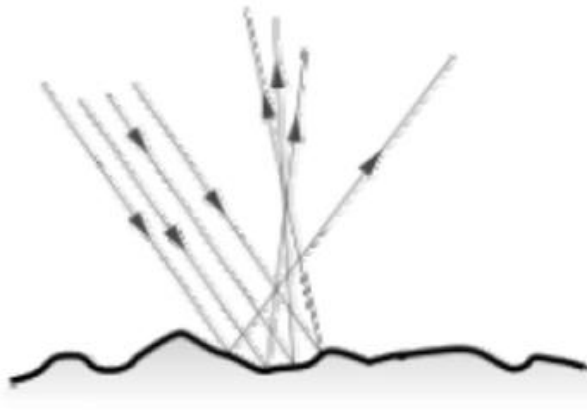


Figura 2.19 – Reflexão difusa. Fonte: [10].

3. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

Este capítulo apresenta a modelagem, bem com a implementação, do sistema de orientação automática de espelhos para placas solares.

3.1 INTRODUÇÃO

Percebe-se que o consumo de energia elétrica vem aumentando cada vez mais. Visando atender essa demanda, torna-se necessário, além de um uso mais consciente de aparelhos elétricos, uma produção mais eficiente de energia.

No atual cenário social, verificou-se maior aproveitamento da energia solar para gerar energia elétrica. A maneira mais comum de realizar a conversão de energia solar para elétrica é por meio de células fotovoltaicas. Esta, por sua vez, é caracterizada por ser uma conversão direta, ou seja, mediante o efeito fotovoltaico, tem-se a conversão direta da luz solar em energia elétrica. No entanto, os módulos fotovoltaicos caracterizam-se por ter uma baixa eficiência, por volta de 10% e, portanto, o grande problema desse tipo de tecnologia é encontrar maneiras baratas e eficientes para aumentar a produção de energia elétrica.

Buscando solucionar esse problema, surgiu a ideia de utilizar a concentração solar. Essa ideia consiste em usar espelhos para redirecionar os raios solares, que não incidem diretamente sobre as placas solares, para os módulos.

Portanto, esse é o principal embasamento para propor a criação de um protótipo, de modo a verificar a influência dos raios refletidos por espelhos em uma placa solar. Tem-se o intuito de fazer uma verificação por meio da prática, visando analisar se a metodologia proposta é uma boa solução para aumentar a produção de energia elétrica.

3.2 SOLUÇÃO PROPOSTA

A proposta de projeto consiste no uso de dois espelhos planos para refletir os raios solares em uma placa solar. Esses espelhos, controlados por motores de passo, acompanham o movimento aparente do Sol no sentido Leste-Oeste, de modo a otimizar e aumentar a incidência dos raios refletidos na placa.

As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam a disposição dos espelhos de acordo com o posicionamento do Sol ao longo do dia. Elas demonstram, de modo geral, o princípio de

funcionamento do sistema proposto. Percebe-se que, na parte da manhã, o Espelho 1 necessita estar em uma angulação, em relação a base do sistema, maior do que o Espelho 2, o que se deve ao fato do Sol nascer no Leste. O oposto ocorre na parte da tarde.

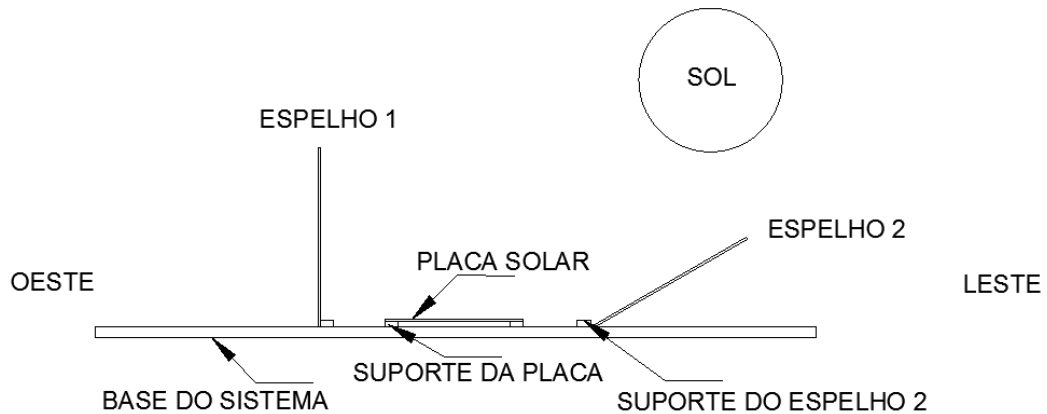


Figura 3.1 – Posicionamento dos espelhos durante o início da manhã.

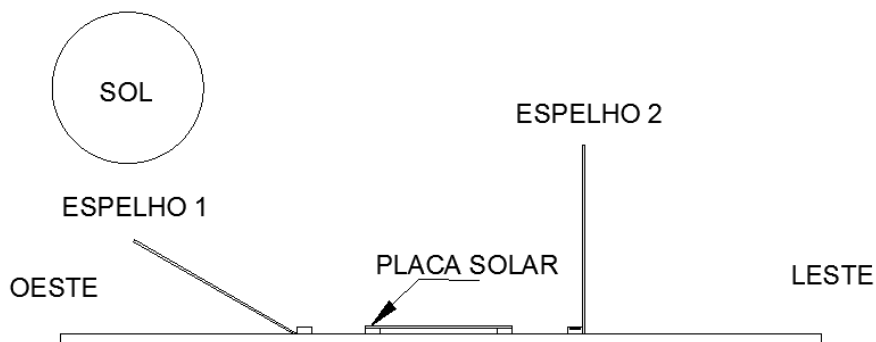


Figura 3.2 – Posicionamento dos espelhos durante o final da tarde.

Todos os detalhes para o posicionamento adequado dos espelhos foram analisados durante a modelagem e implementação do protótipo proposto.

Na referência [9], tem-se que o uso de apenas um espelho aumentou o rendimento da placa em 7%, dessa forma, como o protótipo proposto utiliza-se a concentração em “V”, bem como a melhor orientação dos espelhos, espera-se encontrar valores de rendimento maiores do que 7%.

3.3 MODELAGEM DO SISTEMA

Para a implementação do sistema proposto, os espelhos, além de acompanhar o Sol, precisam refletir os raios solares em um ponto fixo e específico. Dessa forma, torna-se necessário utilizar as leis de reflexão para que os raios refletidos incidam sobre a placa no local desejado.

Para executar essa análise e encontrar a melhor orientação dos espelhos, foram feitas algumas simplificações da estrutura proposta: a primeira simplificação consiste em analisar apenas o Espelho 1, omitindo por enquanto o Espelho 2; a segunda é considerar o Espelho 1 a 90° da base da estrutura. Essas simplificações podem ser observadas na Figura 3.3.

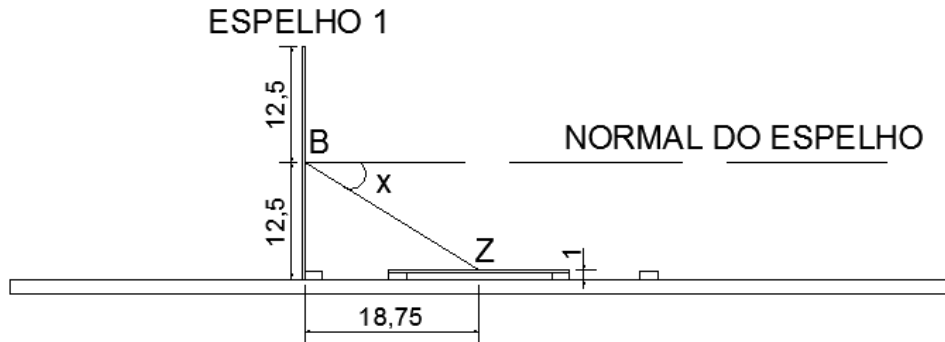


Figura 3.3 – Ângulo de reflexão (x) para o Espelho 1 posicionado a 90° em relação a base do sistema.

Na Figura 3.3 é possível observar a reta normal do Espelho 1, bem como o ângulo de reflexão (x) para um raio que incide no centro do espelho e atinge o centro da placa. Conhecer o valor do ângulo de reflexão é o primeiro passo para modelar o sistema de espelhos proposto.

Utilizando os dados de distância (em centímetros), usados para a construção do protótipo, e aplicando trigonometria, é possível achar x. Percebe-se que a distância da base do espelho para o centro da placa (18,75 cm) e a metade da altura do Espelho 1 (12,75cm) menos a altura do centro da placa solar (1cm), formam o cateto de um triângulo retângulo, sendo a hipotenusa dada pela reta que liga os pontos Z e B. Assim, tem-se:

$$\frac{\text{Cateto oposto}}{\text{Cateto adjacente}} = \text{tg}(x) \quad (3.1)$$

$$\frac{12,5 - 1}{18,75} = \text{tg}(x) \quad (3.2)$$

$$x = 31,5767^\circ \quad (3.3)$$

Sabendo o ângulo de reflexão (x) é possível determinar de incidência (y), ilustrado na Figura 3.4, do raio luminoso que incide no centro do espelho, nesse caso, o raio oriundo do Sol. De acordo primeira lei da Reflexão, percebe-se que:

$$x = y \quad (3.4)$$

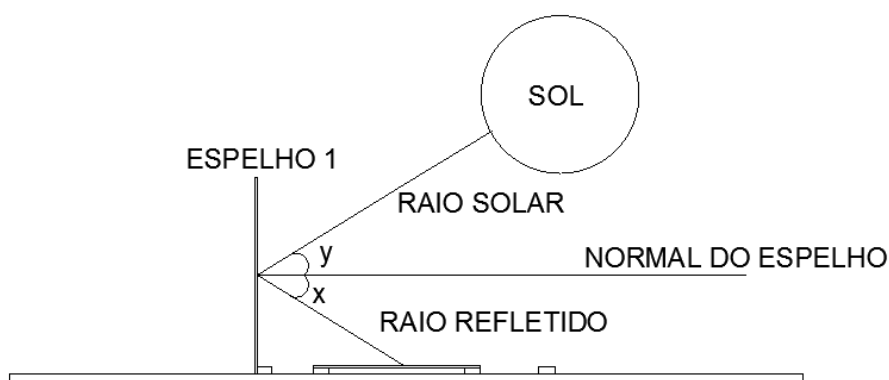


Figura 3.4 – Ângulo de incidência (y) de reflexão (x) para o Espelho 1 posicionado a 90° em relação a base do sistema.

No sistema proposto, o Espelho 1 quando se encontra a 90°, tem a sua parte reflexiva apontando para o Leste. Esse é o local do nascer do Sol. Então para continuar a análise calculou-se o ângulo horário (w) do amanhecer do Sol dado pela Equação 2.8.

Percebe-se que, para encontrar o ângulo horário, torna-se necessário saber a latitude local (ϕ) e a declinação solar (δ). No caso de Brasília, local aonde foram coletados os dados do protótipo, a latitude é $-15,02^\circ$. Já para determinar o valor da declinação solar, Equação 2.3, é necessário saber o dia juliano (n). Para simplificar a análise, considerou-se n igual a 306. Vale ressaltar que o valor do dia juliano deve variar de acordo com os dias do ano utilizados para coletar os dados gerados pelo protótipo criado. Portanto, utilizando esses dados, obtém-se:

$$\text{sen}(\delta) = -\text{sen}(23,45) \cdot \cos\left(\frac{360 \times (306 + 10)}{365,25}\right) \quad (3.5)$$

$$\delta = -15,66^\circ \quad (3.6)$$

Logo, o ângulo horário do pôr-do-sol será dado por:

$$w = \cos^{-1}(-\text{tg}(-15,66) \times \text{tg} - (15,02)) \quad (3.7)$$

$$w = 94,31^\circ \quad (3.8)$$

Por consequência, o ângulo horário do amanhecer do Sol é:

$$w = -94,31^\circ \quad (3.9)$$

Portanto, utilizando a Equação 2.4, tem-se que a hora solar (Hs) para o nascer do Sol é

de:

$$H_s = 5,71 \text{ horas} \quad (3.10)$$

A hora solar calculada representa a hora do nascer do Sol para o dia juliano 306. Para essa hora, o Sol encontra-se na linha do horizonte, que, no caso da Figura 3.4, seria em direção a reta normal do Espelho 1. Então, para ter raios solares que possuam ângulo de incidência igual a y (Figura 3.4) é necessário passar certo tempo após o amanhecer do Sol.

De acordo com a referência [7], o posicionamento do Sol varia 15° por hora no sentido Leste-Oeste. Então, para o Sol variar o seu posicionamento da linha do horizonte até o ponto no qual os raios solares tenham um ângulo de incidência igual a y deve-se passar o seguinte tempo:

$$P = \frac{y}{15} = 2,104 \text{ horas} \quad (3.11)$$

Sendo L igual a diferença de horas entre o Sol na posição da linha do horizonte para o Sol posicionado de acordo com a Figura 3.4. Portanto, somando-se P com a hora solar do nascer do Sol, tem-se o momento no qual o Sol promove uma incidência de y .

$$\text{Hora solar 1} = \text{Hora solar 2} + P \quad (3.12)$$

Onde,

- Hora solar 1 - hora solar para a posição da Figura 3.4;
- Hora solar 2 - hora solar do nascer do Sol;
- P = diferença em horas para o Sol variar seu posicionamento da linha do horizonte para a Posição da Figura 3.4.

$$\text{Hora solar 1} = 5,71 + 2,104 \quad (3.13)$$

$$\text{Hora solar 1} = 7,85h \quad (3.14)$$

Para passar a hora solar para o tempo civil basta utilizar as Equações 2.9, 2.10 e 2.11. A longitude de Brasília é de $-47,92^\circ$ e a longitude padrão do fuso é de -45° . Sabendo esses valores tem-se:

$$\Omega = 2\pi(306 - 1) \div 365 \quad (3.15)$$

$$\Omega = 5,25 \quad (3.16)$$

Logo,

$$\begin{aligned} E = & (0,000075 + 0,00186\cos(5,25) - 0,032077\sen(5,25) \\ & - 0,0146115 \cos(2 \times 5,25) \\ & - 0,04089\sen(2 \times 5,25)) \times 229,18 \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$E = 16,397 \text{ minutos} \quad (3.18)$$

Portanto,

$$\text{Hora solar} - \text{Hora oficial} = 4 \times (-45 + 47,92) + 16,397 \quad (3.19)$$

$$\text{Hora solar} - \text{Hora oficial} = 28,077 \text{ minutos} \quad (3.20)$$

Dessa forma, fazendo as conversões de horas para minutos, bem como utilizando o valor encontrado na Equação 3.20, tem-se que o Espelho 1, deve-se posicionar a 90° em relação a base as 7 horas e 46 minutos. Como já mencionado, esse valor depende do dia juliano a ser utilizado para coletar os dados. Também não se pode esquecer do horário brasileiro de verão, em que se deve somar mais uma hora no valor encontrado. Todas essas modificações devem e são ajustadas no código para o Arduino utilizado pelo protótipo.

Agora sabe-se a hora do dia que se tem a reflexão dos raios luminosos na placa solar para quando o Espelho se encontra na posição da Figura 3.4. Então, para garantir que raios refletidos continuem incidindo na placa ao longo do dia, basta o Espelho 1 acompanhar a movimentação aparente do Sol no sentido Leste-Oeste.

Como já mencionado, o Sol modifica o seu posicionamento no sentido Leste-Oeste cerca de 15° por hora e, visando isso, o Espelho 1, para acompanhar o Sol, deve executar o mesmo deslocamento.

Na Figura 3.5 o ângulo L representa o tanto que o Espelho 1 deve variar, em graus, para acompanhar o Sol (15° por hora).



Figura 3.5 – Ângulo de deslocamento (L) em relação a normal da base do Espelho 1 para ele acompanhar o Sol.

A Figura 3.6 mostra o que acontece com o raio que incide a placa solar caso o espelho acompanhe o Sol, isto é, o raio refletido pelo espelho continua atingindo o local desejado para o deslocamento leste-oeste dado pelo movimento de rotação da Terra.

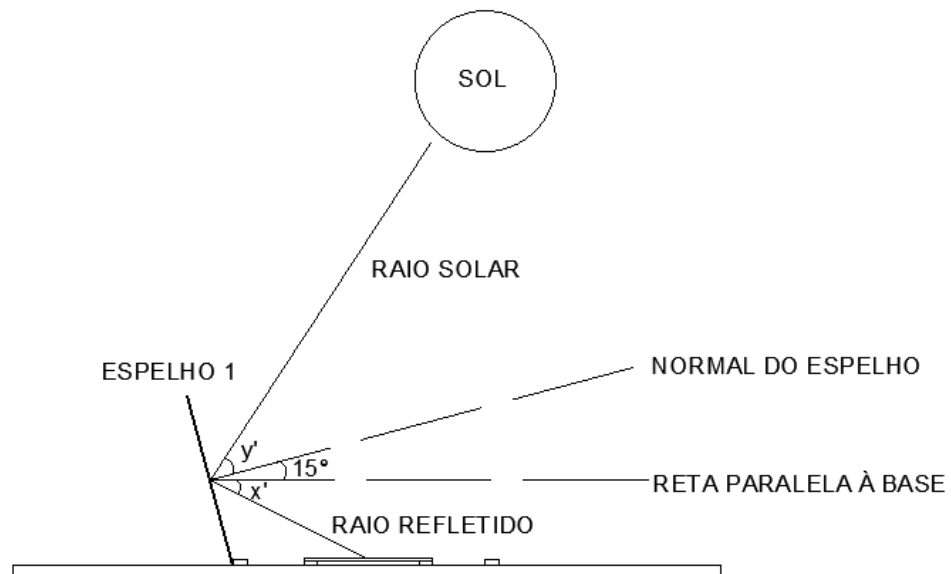


Figura 3.6 – Deslocamento do Espelho 1 de 15° para acompanhar o movimento aparente do Sol ao longo de uma hora.

Agora que se sabe o movimento que deve ser realizado pelo Espelho 1 e o momento em que esses deslocamentos devem ocorrer, torna-se importante definir como essas variações de posições vão acontecer. Então, para o controle de cada espelho tem-se dois motores fixados à frente da parte reflexiva. Assim, para realizar a análise a seguir, faz-se de novo a simplificação de analisar apenas o Espelho 1 e, além disso, considera-se os motores de passo que controlam cada espelho são perfeitamente idênticos e executam os mesmos movimentos quando solicitados.

O Espelho 1 e o motor de passo são conectados por um fio de nylon, com é possível observar na Figura 3.7:



Figura 3.7 – Distância (Dn) da conexão entre o espelho e o motor de passo por meio do fio de nylon.

Considera-se a distância Dn (Figura 3.7) como sendo a distância entre o topo do Espelho 1, com o eixo do motor de passo. Percebe-se que para executar o deslocamento do espelho o motor de passo deve variar a distância Dn dada pela linha de nylon. O objetivo em questão é determinar uma relação dessa distância para com o ângulo L (Figura 3.5). Percebe-se que quando L é nulo a distância Dn é igual a D0 (Figura 3.8).

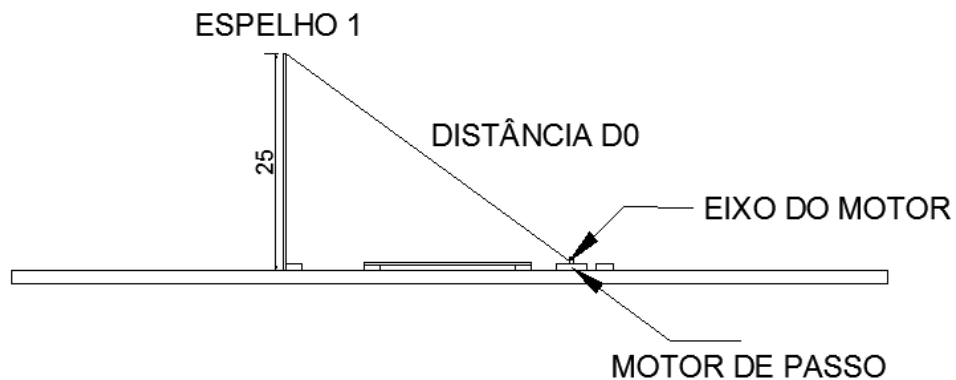


Figura 3.8 – Distância (D0) do topo do Espelho 1 e o eixo do motor.

Ao analisar a Figura 3.7, nota-se que Dn é a hipotenusa do triângulo retângulo formado pelos catetos de distância J e de H menos a altura do eixo do motor (2,2 cm). Então tem-se:

$$Dn = \sqrt{J^2 + (H - 2,2)^2} \quad (3.21)$$

Sendo, J composta pela soma das distancias de 33 cm e Q.

Assim, para determinar Dn, falta conhecer os valores das distâncias H e Q. Percebe-se que, H e Q formam os catetos de um triângulo retângulo sendo a hipotenusa o comprimento do Espelho 1 (25 cm). Além disso, um dos ângulos desse triângulo retângulo é M. Nota-se que M é o ângulo complementar de L (Figura 3.5). Portanto, tem-se:

$$M = 90 - L \quad (3.22)$$

Sabendo o valor de M , é possível encontrar uma relação para os catetos H e Q . Utilizando trigonometria, é possível saber que:

$$\text{sen}(M) = \frac{\text{Cateto oposto}}{\text{Hipotenusa}} = \frac{H}{25} \quad (3.23)$$

$$H = 25 \times \text{sen}(M) \quad (3.24)$$

$$H = 25 \times \text{sen}(90 - L) \quad (3.25)$$

Além disso, tem-se o seguinte:

$$\text{cos}(M) = \frac{\text{Cateto adjacente}}{\text{Hipotenusa}} = \frac{Q}{25} \quad (3.26)$$

$$Q = 25 \times \text{cos}(M) \quad (3.27)$$

$$Q = 25 \times \text{cos}(90 - L) \quad (3.28)$$

Utilizando as Equações 3.25 e 3.28 e fazendo as substituições devidas na Equação 3.21, obtém-se a seguinte expressão:

$$Dn = \sqrt{(33 + 25 \times \text{cos}(90 - L))^2 + (25 \times \text{sen}(90 - L) - 2,2)^2} \quad (3.29)$$

O objetivo de encontrar uma relação entre Dn e o ângulo L é expresso pela Equação 3.29. Para continuar a análise considera-se $D0$ o valor dado pela Equação 3.29 para quando L é igual a 0° , e $D1$ o valor para L igual a $3,75^\circ$, portanto:

$$D0 = 40,11 \text{ cm} \quad (3.30)$$

$$D1 = 41,4365 \text{ cm} \quad (3.31)$$

Então, para passar da distância $D0$ para $D1$, tem-se a seguinte variação de centímetros:

$$D1 - D0 = 1,3265 \quad (3.32)$$

Logo, o número de voltas que devem ser executadas para o deslocamento de $3,75^\circ$ será dado pela distância $D1$ menos $D0$ sobre o comprimento do eixo do motor (2,7 cm). Assim, para esse caso:

$$O = \frac{D1 - D0}{G} \quad (3.33)$$

Onde,

- O é o número de voltas necessárias para deslocar o espelho $3,75^\circ$;
- G é o comprimento do eixo do motor de passo (2,7 cm).

$$O = 0,4911 \quad (3.34)$$

No código utilizado pelo protótipo, considerou-se que o espelho irá se deslocar $3,75^\circ$ a cada 15 minutos, portanto, um controle em malha aberta. Ele encontra os valores de D_n para as variações de L desejadas. O código determina também o número de voltas que devem ser executadas pelos motores de passo a cada deslocamento, sempre fazendo a subtração da distância D_n anterior para a atual e dividindo esse valor pelo comprimento do eixo do motor.

Vale salientar que, para a solução proposta, devido às limitações físicas, a menor angulação entre a base do sistema e os espelhos é de aproximadamente 40° , pois caso haja uma angulação menor do que esse valor, os motores de passo não são capazes de suportar a tração do fio de nylon que liga o eixo dos motores e o topo dos espelhos.

É importante ressaltar que todas as análises realizadas para o Espelho 1 podem ser extrapoladas para o Espelho 2, com apenas algumas diferenças. O Espelho 1 quando está a 90° da base do sistema, ele se encontra na sua posição inicial, enquanto que Espelho 2, a 90° , está na posição final.

Então, para deslocar o Espelho 2, tem-se a variação da distância de D_1 para D_0 , o que é exatamente o oposto do para o caso do Espelho 1. Vale ressaltar que todas essas variações são atendidas no código para a criação do protótipo. Sendo desconsideradas possíveis sombras dada pela radiação difusa dos raios solares.

3.4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Para a construção do sistema que movimenta os espelhos foram utilizados componentes eletrônicos e motores de passo, possibilitando por meio da programação desses componentes o controle de giro dos motores e, portanto, o controle da angulação dos espelhos em diferentes horários de um mesmo dia.

Como base para controle e programação e do projeto, foi usado o Arduino Uno, uma

placa de micro controlador baseada no ATmega328 contendo 14 pinos de entrada/saída digital, 6 desses tendo capacidade de PWM, 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, um conversor analógico-digital e conexão USB. Essas especificações são suficientes para a concepção do projeto proposto, permitindo o controle de todos os motores e a recepção e análise de todos os dados recebidos. Para controlar as funções da placa Arduino são necessários um computador e um *software open-source* chamado *Arduino Software*, onde este pode ser executado nos sistemas operacionais Windows, Mac OS e Linux.



Figura 3.9 – Placa Arduino Uno. Fonte: [11].

O software de código aberto Arduino (IDE) é uma plataforma que permite a comunicação entre *hardware* e *software* para as diferentes placas Arduino, permitindo o envio de instruções feitas pelo usuário para as placas de interesse de forma simplificada. A linguagem de programação utilizada no Arduino é a linguagem C++ com pequenas modificações, que é uma linguagem muito tradicional. O software Arduino (IDE) foi utilizado para o controle da placa Arduino Uno e para a recepção, tratamento de dados e controle de todos os sensores e motores presentes no projeto.

O conversor analógico digital do Arduino Uno converte um sinal analógico aplicado a uma das portas analógicas para um sinal digital, que, pode ser lido por meio de códigos específicos. O conversor do Arduino tem uma resolução de 10 bits, ou seja, o resultado da conversão gera um número entre 0 e 1023. A conversão faz a seguinte operação:

$$Sinal\ digital = \frac{sinal\ analógico * 1023}{tensão\ de\ referência} \quad (3.35)$$

As tensões de referência possíveis com o uso do Arduino são 5V e 3.3V. A tensão de referência usada no projeto foi a de 5 V. O *range* do sinal é de 0 a 1023. Um sinal de 0V aplicado na porta A0 representa um sinal de saída de valor 0 e um sinal de 5V aplicado na porta A0, com referência de 5 V, representa um sinal de saída de valor 1023.

Os componentes usados no projeto, além da placa Arduino, foram:

- 2 painéis solares de 2,5 W;
- 1 Módulo RTC (*Real Time Clock*) DS1307;
- 2 sensores de temperatura LM35DZ;
- 4 motores de passo modelo 28BYJ-48;
- 4 drivers para motor de passo modelo ULN2003;
- 2 fontes de alimentação de 5V;
- 10 resistores de 100 Ω ;
- 2 espelhos de 25x18 cm;
- 1 painel de madeira;
- 1 carretel de fio de Nylon 20mm;
- 8 parafusos;
- 1 Protoboard.
- Jumpers;

Os painéis solares utilizados no projeto são de tamanho reduzido, tendo estes 19,4 cm de altura por 12 cm de largura. Os painéis são feitos de material policristalino, com potência de 2,5 W, tensão de 18 V e corrente de 138 mA em seu ponto de máxima potência. Foram utilizados esses painéis de menor tamanho para facilitar toda a estrutura e dimensão do projeto. No projeto, os espelhos devem ser do mesmo tamanho ou maiores que os painéis solares, proporcionando uma reflexão dos raios solares que atinjam toda a área do painel. Usar um painel menor implica na possibilidade de usar espelhos menores, o que facilita o projeto como um todo sem prejuízo nos testes e resultados.



Figura 3.10 - Painel solar de 2,5 W. Fonte: [11].

Figura 3.12 - Sensor de Temperatura - LM35DZ. Fonte: [11].

Os motores de passo 28BYJ-48 utilizados têm tensão de alimentação de 5V, possuem 4 polos e ângulo de passo de aproximadamente $0,0878^\circ$. Para o projeto, são usados dois motores para cada espelho, Figura 3.20, em que um fio de nylon foi enrolado em cada eixo e as extremidades de cada fio fixadas no topo dos espelhos. Os eixos dos motores foram adaptados com peças de metal que aumentam seu tamanho, facilitando o uso da corda de nylon neles enrolada. O controle dos espelhos é feito de forma em que se considera o eixo de cada motor como circular e tendo um perímetro de 2,7 cm, sendo que a cada rotação completa de eixo move-se 2,7 cm do fio de nylon.



Figura 3.13 - Motor de Passo - 28BYJ-48. Fonte: [11].

Os drivers para motor de passo ULN2003 foram usados para facilitar o controle dos motores, possibilitando o uso de bibliotecas de controle e alimentação facilitada, permitindo uma alimentação de 5 V e 500 mA, sendo que, para cada motor foi necessário o uso de um driver. Por meio do circuito integrado presente no *driver*, os comandos de rotação se tornam mais simples de serem executados devido às bibliotecas de controle existentes. Por esses motivos, optou-se pelo seu uso. A alimentação dos *drivers* foi feita através de fontes de alimentação externas ao Arduino Uno.



Figura 3.14 - Driver de motor de passo – ULN2003. Fonte: [11].

Para alimentação dos drivers, que conectam os motores ao Arduino Uno, foram usadas duas fontes de alimentação externa de 5 V e 1 A, onde cada fonte alimenta dois drivers (dois motores). Devido ao grande número de motores, o Arduino Uno não consegue alimentar todos

eles devido a sua limitação de corrente de 500 mA. Assim, optou-se por utilizar fontes externas, Figura 3.15, para fornecer a energia necessária para o acionamento dos motores.



Figura 3.15 - Fonte de 5 V. Fonte: [11].

Para a coleta de informação de geração de energia dos módulos solares, considerou-se o módulo como uma fonte de corrente e desprezou-se suas perdas internas. Assim, tem-se para cada módulo uma fonte de corrente com especificação de 138 mA, no ponto de operação de máxima potência, nas condições de 1000 W/m² e 25 °C. No ponto de máxima potência, a placa é conectada a uma carga de 131,27 Ω.

O Arduino Uno tem capacidade de ler tensões de 0 a 5 V. Com a corrente gerada pelo módulo, é possível transformá-la em tensão por meio de um simples resistor de pequeno valor. É desejável que a tensão no resistor seja proporcional a corrente gerada pelo módulo. Logo, é necessário operar na região próxima ao ponto de máxima tensão do módulo, onde a corrente gerada é diretamente proporcional à radiação incidente. Assim, usando resistor com valor baixo, é possível ter uma amostra da geração de energia do módulo que é proporcional à radiação incidente.

A especificação de 138 mA é válida para o ponto de operação de máxima potência, nas condições de 1000 W/m² e 25 °C. Ao operar próximo ao ponto de corrente de curto circuito, a corrente gerada pelo módulo é um pouco maior que a corrente no ponto de máxima potência. Além disso, espera-se que o módulo que receberá a radiação refletida pelos espelhos gere correntes maiores que o módulo sem espelhos.

Por esses motivos foi utilizado um resistor de valor consideravelmente menor que os 36 Ω. Utilizando 20 Ω, a corrente máxima que limita a medição dos dados pelo Arduino Uno seria de 250 mA.

O valor máximo de resistência a ser utilizada é de 36 Ω, onde a corrente de 138 mA

passando por esse atinge o valor de 5 V de tensão no resistor, tensão máxima possível de ser lida pelo Arduino Uno. Valores menores de resistência fornecem tensões máximas menores.

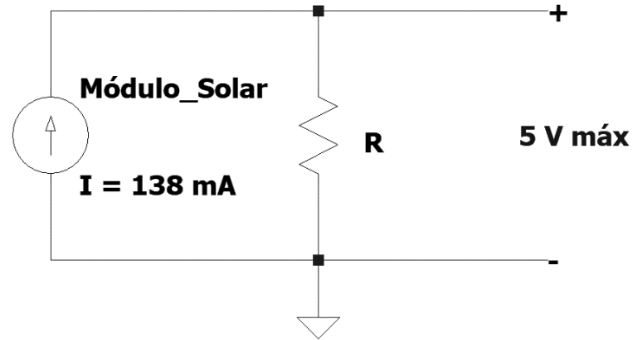


Figura 3.16 – Circuito de captação de dados.

Para o projeto foi escolhido o valor de resistência de $20,8 \Omega$. Usando este valor, opera-se na região de operação do módulo de interesse e a tensão máxima gerada não ultrapassa os 5 V, chegando a, no máximo, 2,76 V para a corrente de 138 mA. Assim, o módulo pode gerar correntes de até 240 mA, sendo que, a partir desta corrente, irá saturar a leitura do Arduino Uno em 5 V. Para atingir os $20,8 \Omega$, foram colocados 5 resistores de 100Ω em paralelo, dando assim o valor de resistência pretendido. Fez-se uma ligação direta.

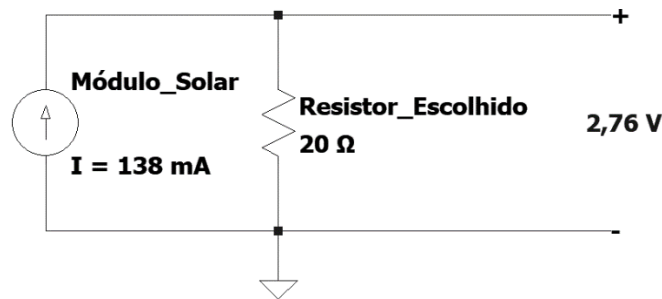


Figura 3.17 – Circuito com resistor escolhido.

Os espelhos utilizados, Figura 3.18, foram espelhos, de dimensões 250 mm por 180 mm. O espelho em si tem 206 mm por 136 mm, área suficiente para a reflexão dos raios solares no módulo solar de 194 mm por 120 mm.



Figura 3.18 – Espelho 250 mm por 180 mm. Fonte: [12].

Para apoiar toda a estrutura com motores, espelhos e módulo solar foi utilizado um painel de madeira de aproximadamente 100 cm por 50 cm, servindo de base de apoio para todos os demais componentes.

Fios de nylon de 20 mm para a conexão entre a parte superior dos espelhos e o eixo dos motores. O fio escolhido é extremamente fino, de forma a praticamente eliminar possíveis sombras que poderiam ser causadas por fio de maior espessura.

As conexões das partes eletrônicas foram feitas com o auxílio de *protoboards* e *jumpers* (fios com conexões apropriadas para protoboards). A Figura 3.19 ilustra todo o circuito de controle.

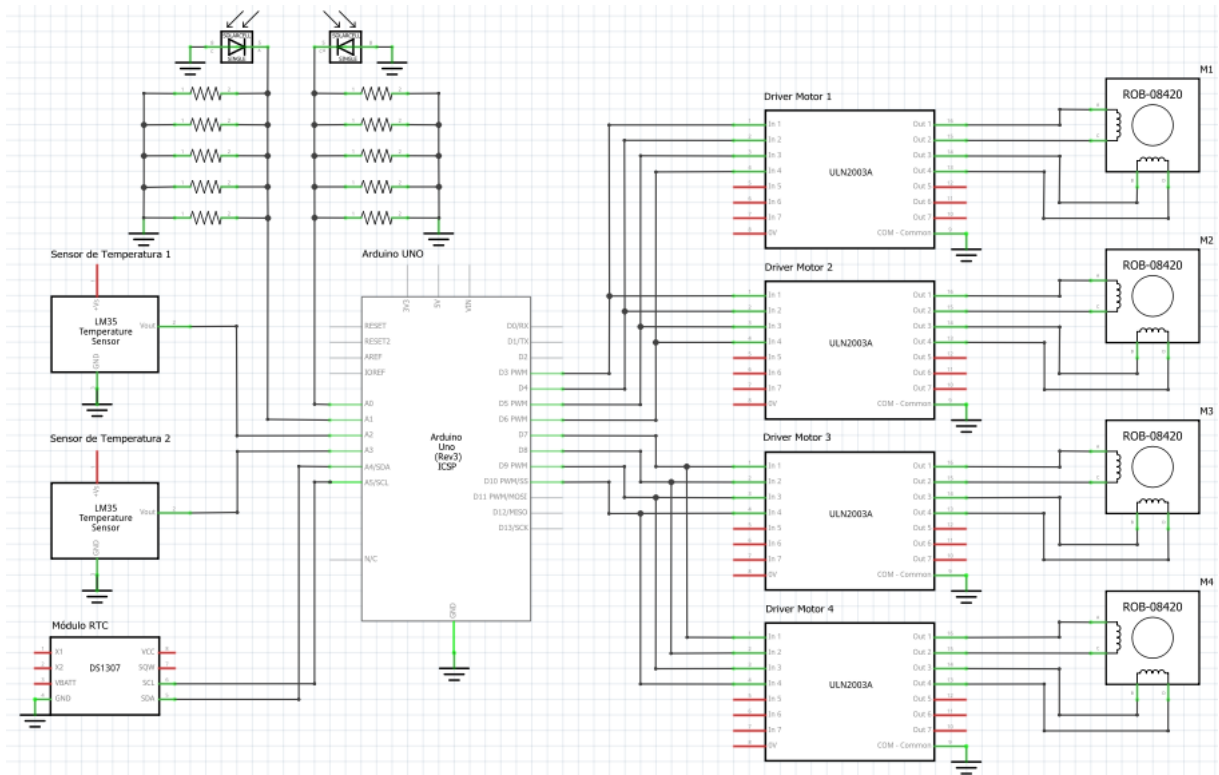


Figura 3.19 – Esquemático do circuito.

Os motores foram fixados no painel de madeira com o uso de parafusos. A estrutura física final, sem a conexão do circuito apresentado na Figura 3.19 do projeto, é apresentada nas figuras 3.20, 3.21, 3.22. O espelho da esquerda está em sua angulação mínima, $37,5^\circ$ enquanto o espelho da direita está em sua angulação máxima $82,5^\circ$.

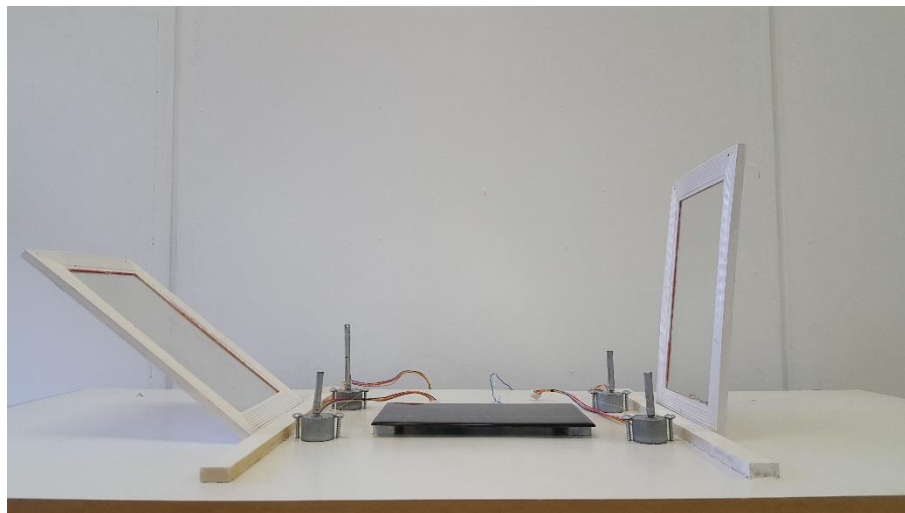


Figura 3.20 – Visão frontal da estrutura física.

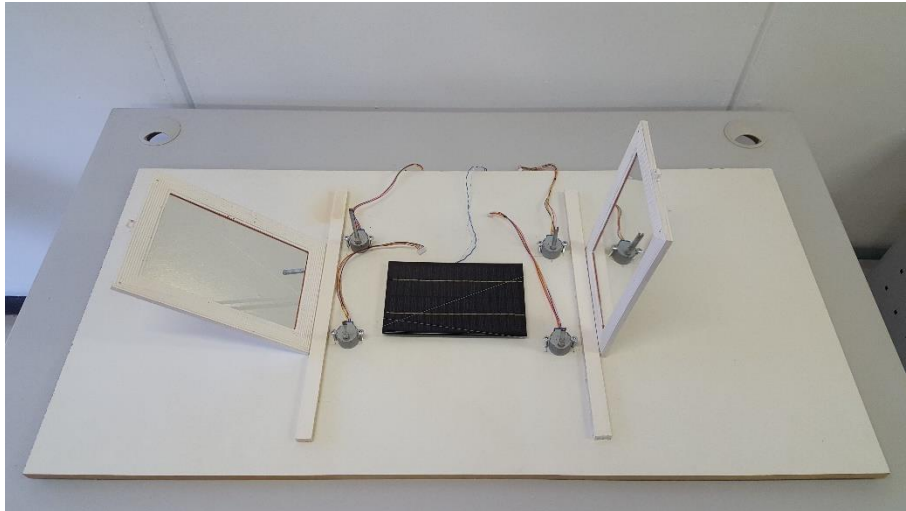


Figura 3.21 – Visão superior da estrutura física.

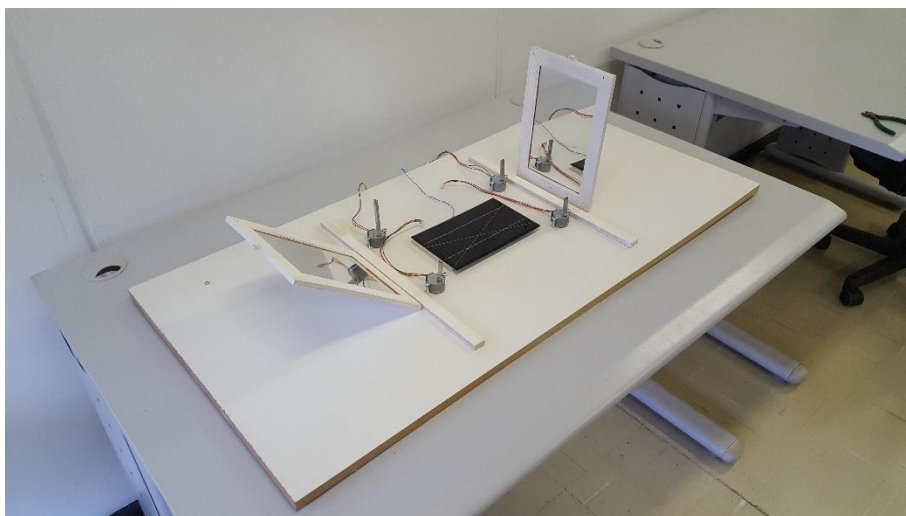


Figura 3.22 – Visão superior lateral da estrutura física.

3.4.1 CÓDIGO

O código utilizado para o controle da placa Arduino Uno na recepção de dados de todos os sensores e para o controle de todos os motores presentes no projeto foi feito no software Arduino (IDE). O código completo usado no projeto está presente em anexo.

O funcionamento do programa segue a Figura 3.18, fluxograma que foi dividido em três partes principais: configurações iniciais, inicialização do sistema e operação padrão do sistema.

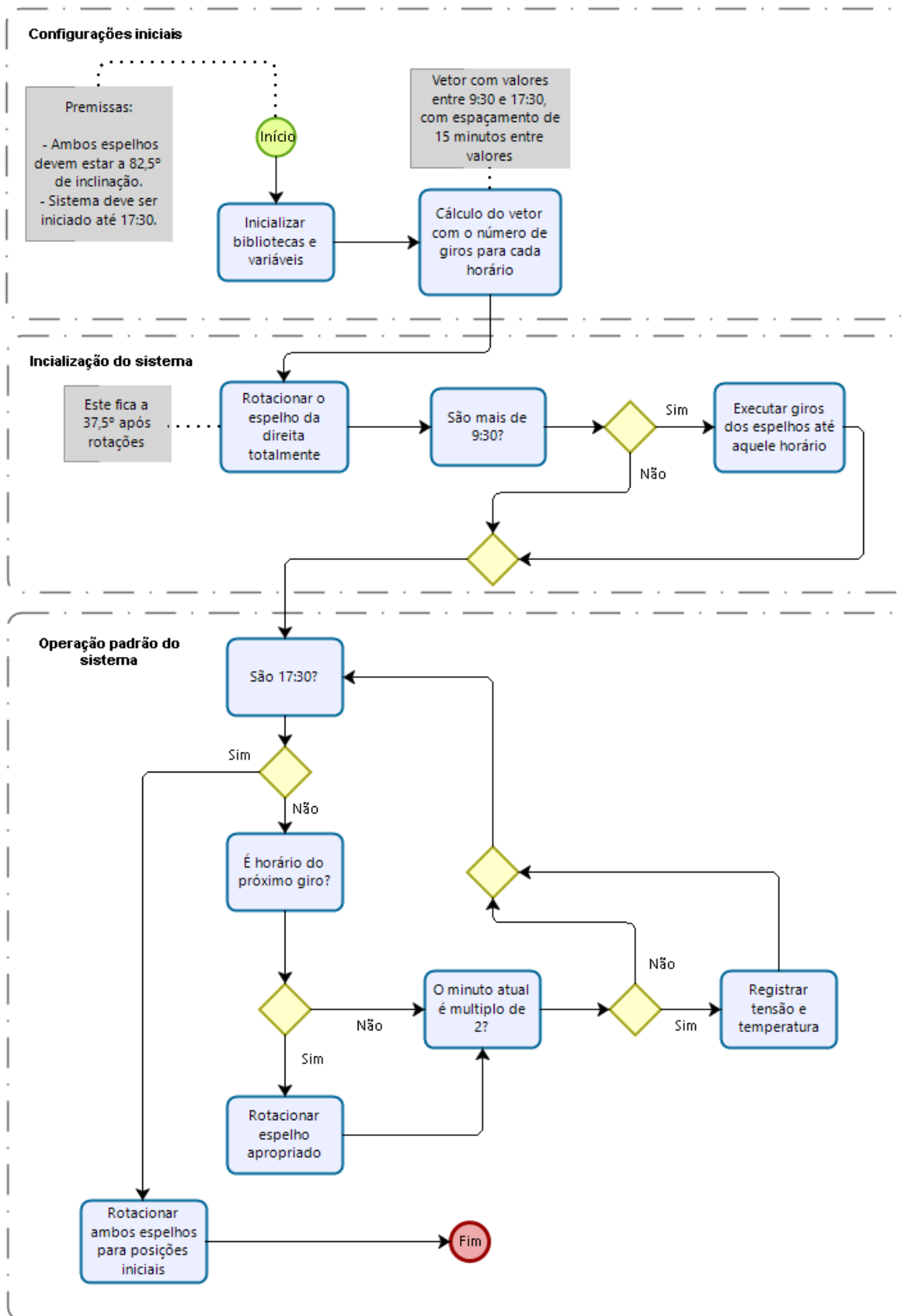


Figura 3.23 – Fluxograma representativo do programa criado.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Este capítulo mostra os resultados obtidos e a respectiva análise desses dados. Tem-se uma comparação entre os valores de corrente adquiridos por uma placa com e sem a automação dos espelhos.

4.1 INTRODUÇÃO

Foi feita uma análise do desempenho de um módulo solar em situação que, além da radiação direta, este recebesse a radiação refletida por dois espelhos planos. Para saber a real influência dos espelhos, foi utilizado outro módulo solar idêntico, porém sem o auxílio dos espelhos.

Foram coletados dados de tensão e temperatura dos dois módulos solares, um com espelhos e outro sem, por 4 dias, de forma interrupta, em novembro e dezembro de 2018. Estes dias, correspondentes aos dias 22, 27 e 30 de novembro e 1 de dezembro serão referidos no decorrer da análise como dias 1, 2, 3 e 4, respectivamente. No dia 1 foram coletados 74 minutos de dados no período da tarde, no dia 2 foram coletados 414 minutos de dados durante os períodos da manhã e da tarde, no dia 3 foram coletados 314 minutos de dados durante os períodos da manhã e da tarde e, por fim, no dia 4 foram coletados 106 minutos de dados também durante os períodos da manhã e da tarde, sendo os dados coletados a cada dois minutos.

Para análise, a tensão lida no resistor de $20,8 \Omega$ foi convertida para corrente, de forma a melhorar a comparação entre os pontos de operação dos módulos. Quando necessárias, foram feitas interrupções na captação de dados de certos dias devido ao tempo chuvoso em certos horários.

A análise dos dados foi feita primeiramente avaliando cada dia separadamente e, posteriormente, uma análise entre os quatro dias será mostrada. Para a análise individual de cada dia, foram separados certos valores de interesse, sendo esses:

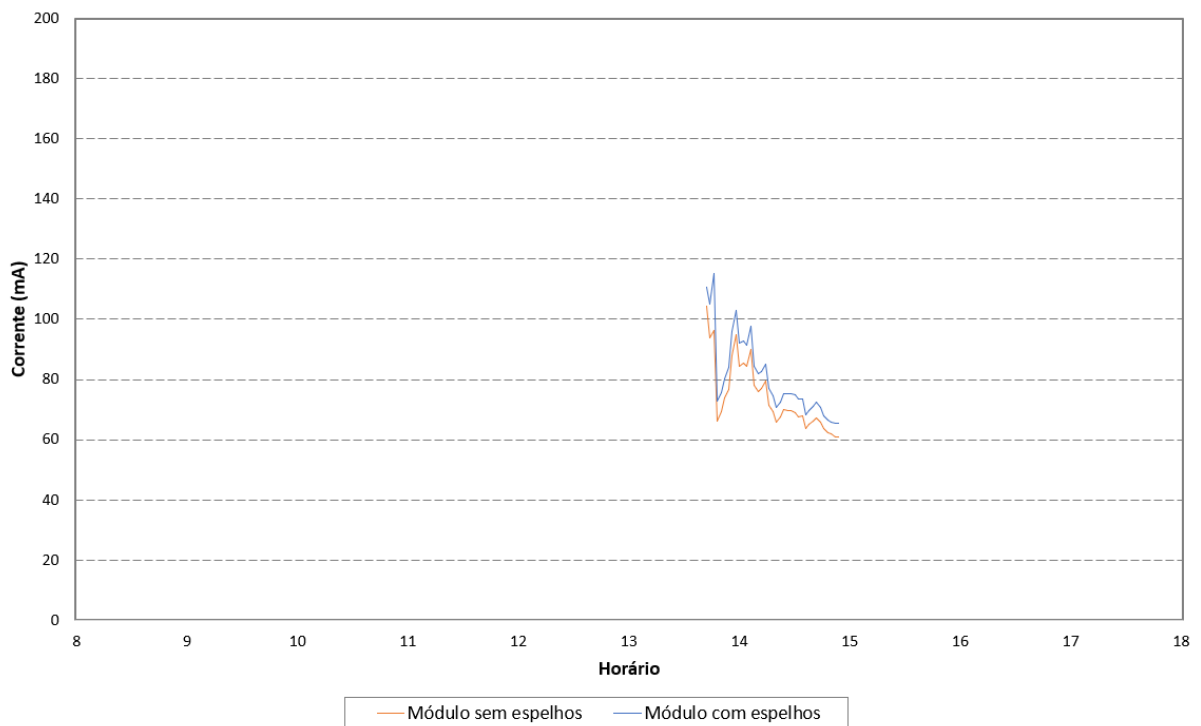
- **Rendimento Médio:** porcentagem referente à geração média de corrente do módulo com espelhos em relação ao módulo sem espelhos, considerando os pontos existentes.

- Maior rendimento: porcentagem referente a maior geração de corrente do módulo com espelhos em relação ao módulo sem espelhos.
- Temperatura média: valor referente a média das temperaturas, considerando os pontos existentes.
- Corrente máxima: valor referente à maior corrente, considerando os pontos existentes.

4.2 DIA 1

Os dados de corrente são mostrados no Gráfico 4.1.

Gráfico 4.1 – Corrente em função do horário para o dia 1.



No dia 1 foram coletadas poucas horas de dados, cerca de uma hora e quinze minutos, devido ao clima chuvoso, o dia foi predominantemente nublado, o que se pode notar pela corrente média das placas solares onde, para o módulo com espelhos, foi de 80,48 mA e, para o módulo sem espelhos, foi de 74,18 mA.

O módulo com espelhos teve um desempenho sempre superior ao outro módulo, tendo em média 8,35 % a mais na geração de corrente.

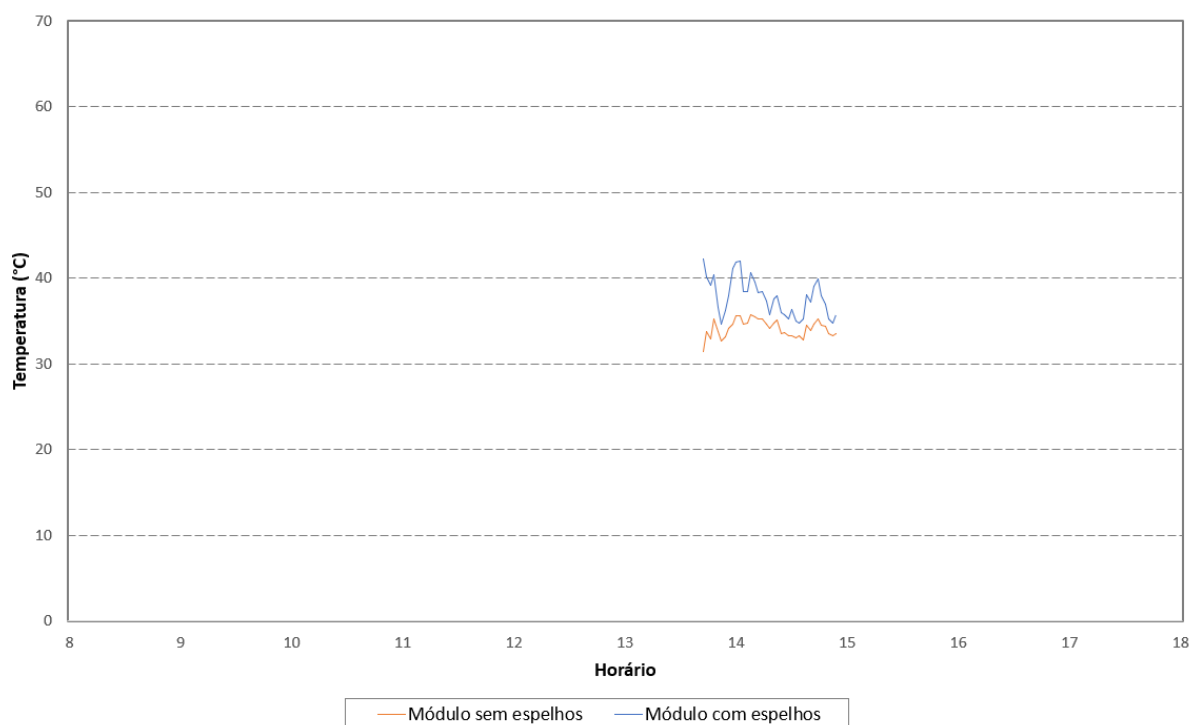
Às 13:46h, próximo ao início da coleta, teve-se a maior corrente em ambas as placas e o maior rendimento global, de 19,67%, com a correntes de 115,35 mA e 96,38 mA para os módulos solares com e sem espelhos, respectivamente. A Tabela 1 mostra dados referentes ao rendimento.

Tabela 4.1 – Rendimentos para o dia 1.

| Rendimento Médio (%) | Maior Rendimento (%) |
|----------------------|----------------------|
| 8,35 | 19,67 |

Os dados de temperatura são mostrados no Gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 – Temperatura em função do horário para o dia 1.



As temperaturas no ponto de maior rendimento foram de 39,2 °C e 32,9 °C representando uma diferença de 6,3 °C. As temperaturas máximas foram de 42,30 °C e 35,80 °C, temperaturas baixas devido ao clima nublado do dia.

Mesmo em um dia nublado, o módulo com espelhos teve uma temperatura substancialmente maior que o módulo sem espelhos. A Tabela 2 mostra dados referentes à temperatura e corrente.

Tabela 4.2 – Temperaturas e correntes para o *dia 1*.

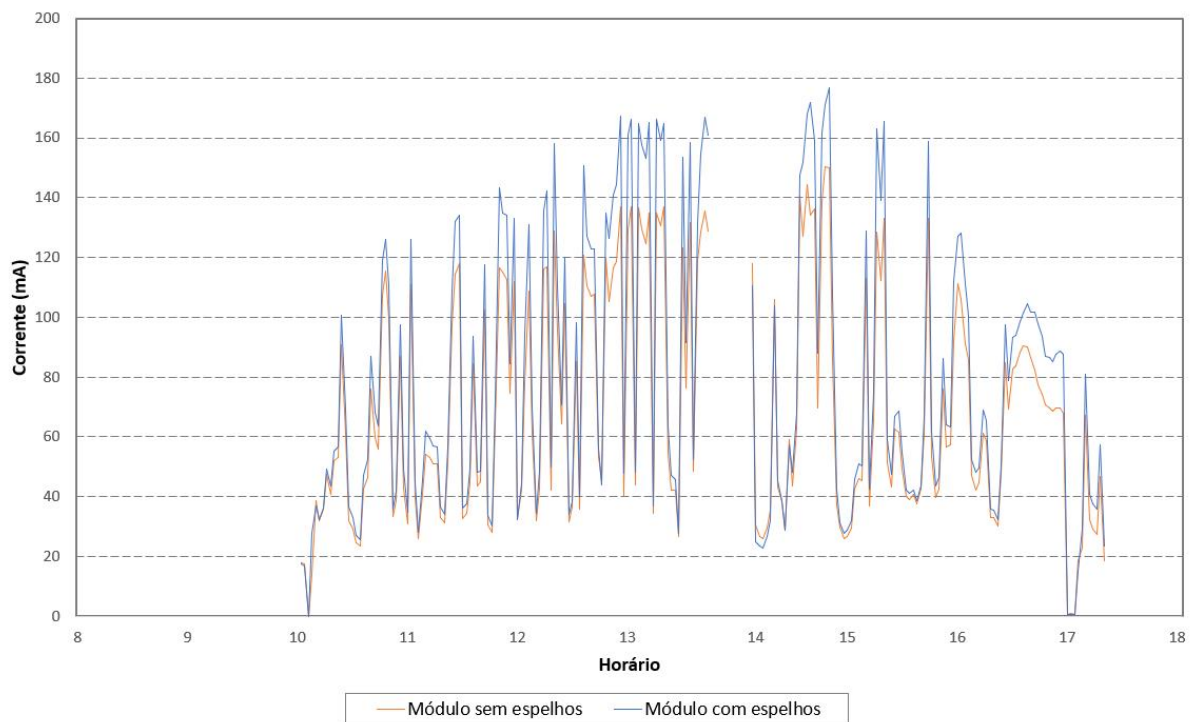
| | Temperatura Média (°C) | Corrente Máxima (mA) |
|-----------------------------|------------------------|----------------------|
| Módulo Com Espelhos: | 37,79 | 115,35 |
| Módulo Sem Espelhos: | 34,15 | 104,54 |

Mesmo o dia 1 não ter muita radiação direta do Sol, obteve-se resultados positivos em relação ao protótipo criado, tendo um ganho de cerca de 8% na produção de energia. Em seu melhor ponto, o módulo com espelhos chegou a gerar cerca de 20% a mais do que a placa solar sem espelhos.

4.3 DIA 2

Os dados de corrente são mostrados no Gráfico 4.3.

Gráfico 4.3 – Corrente em função do horário para o dia 2.



No dia 2 foram coletadas cerca de 7 horas de dados. Foi necessário pausar a coleta próximo às 14:00h devido a uma chuva leve. Apesar desse momento de chuva, o dia foi ensolarado em sua maior parte.

Nesse dia, a placa solar do protótipo nem sempre teve um desempenho superior a placa sem espelhos, tendo pontos de baixa corrente, em razão de momentos de sombra, em que o módulo sem espelhos teve desempenho melhor. Das 7 horas de dados coletados, aproximadamente 6 dessas foram de geração maior para o módulo com espelhos.

Às 14:48h, teve-se a maior corrente em ambas as placas, 174,36 mA e 150,50 mA, respectivamente, ganho de 15,85% a mais. O ponto de maior rendimento ocorreu apenas às 17:16h, momento com nuvens e já próximo do fim da tarde. Nesse ponto, teve-se 30,72% de rendimento, com correntes de 35,98 mA e 27,52 mA.

Considerando os pontos próximos ao de maior rendimento, é provável que, a placa sem espelhos tenha sido sombreada momentaneamente, diminuindo sua geração. Nos pontos adjacentes, o ganho foi de aproximadamente 20% nesses pontos.

Às 17:06h ocorreu o ponto de menor rendimento, sendo este de -19,68%, ou seja, o módulo sem espelhos gerou cerca de 20% a mais que o módulo do protótipo nesse horário, ambos com correntes baixíssimas, de 14,91 mA e 18,57 mA. Esses valores de corrente mostram que era um momento de pouca radiação direta, provavelmente provocado pela passagem de nuvens.

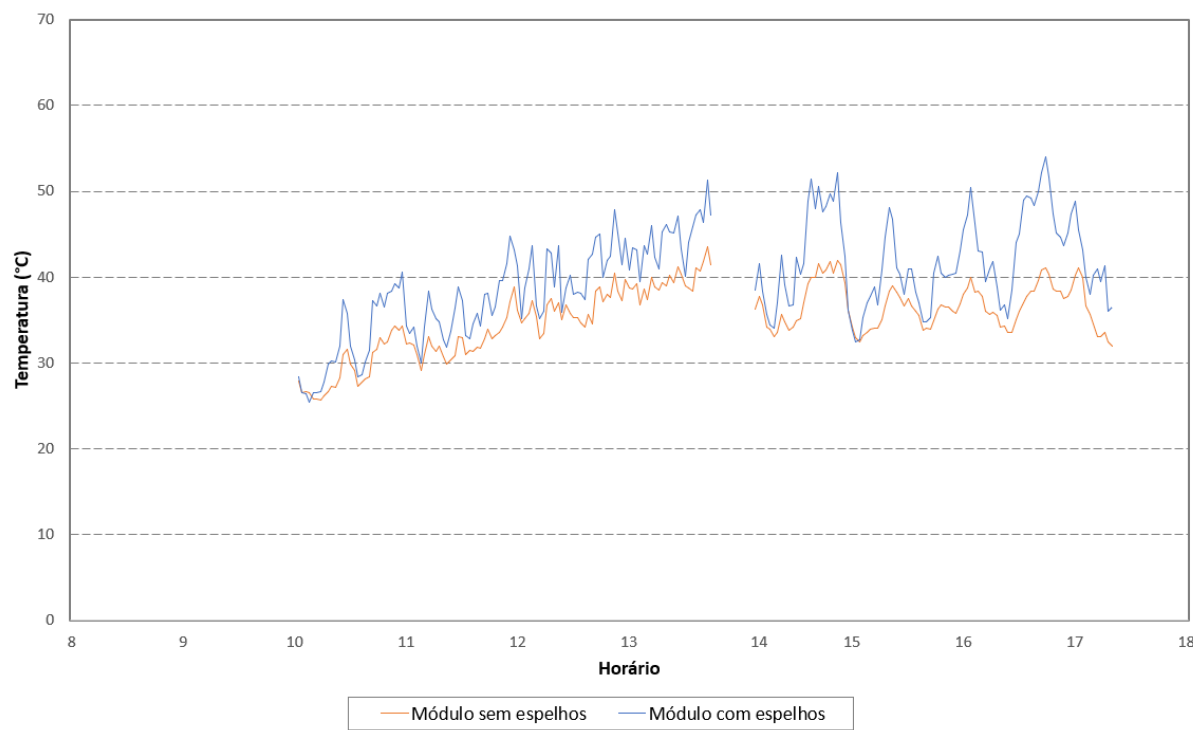
A Tabela 4.3 mostra dados referentes ao rendimento.

Tabela 4.3 – Rendimentos para o *dia 2*.

| Rendimento Médio (%) | Maior Rendimento (%) |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 12,42 | 30,72 |

Os dados de temperatura são mostrados no Gráfico 4.4.

Gráfico 4.4 – Temperatura em função do horário para o dia 2.



As temperaturas no ponto de maior rendimento foram de 41,3 °C e 33,5 °C para os módulos com e sem espelhos, respectivamente, uma diferença de 7,8 °C. As temperaturas máximas foram de 54 °C para a placa do protótipo e 43,5 °C para a placa sem o protótipo, uma diferença de 10,5 °C.

A maior diferença de temperatura foi de 12,9 °C. A Tabela 4.4 mostra dados referentes à temperatura e corrente.

Tabela 4.4 – Temperaturas e correntes para o dia 2.

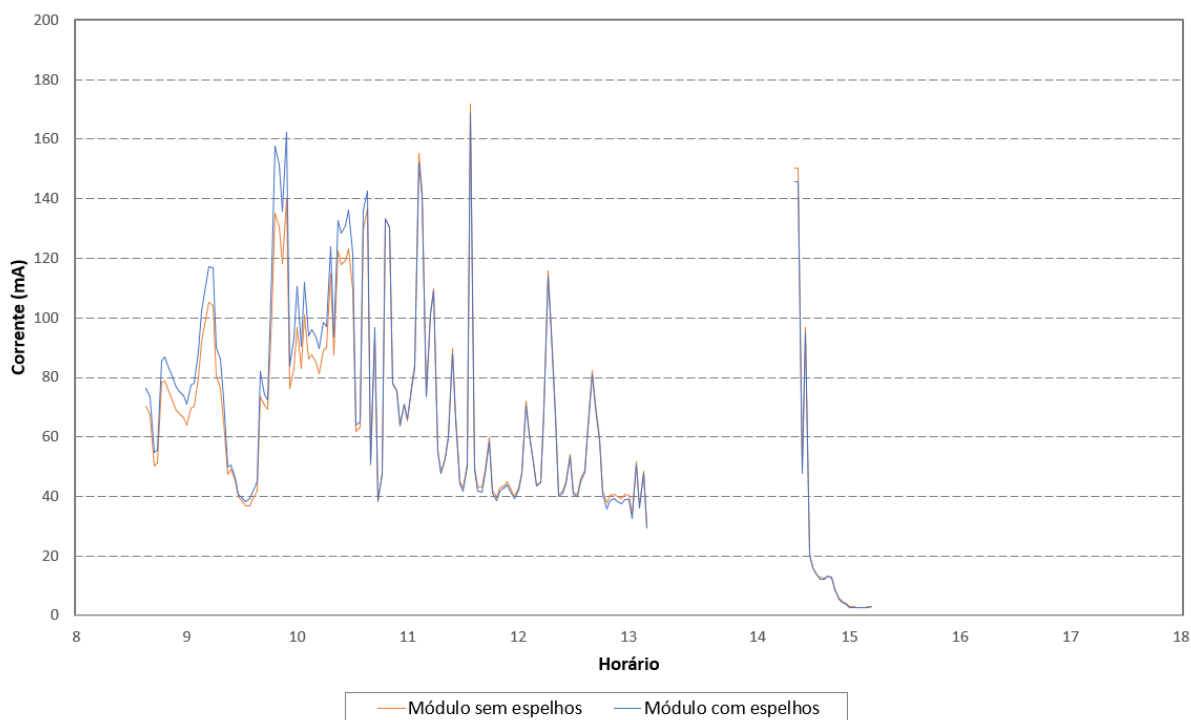
| | Temperatura Média (°C) | Corrente Máxima (mA) |
|-----------------------------|------------------------|----------------------|
| Módulo Com Espelhos: | 39,91 | 174,36 |
| Módulo Sem Espelhos: | 35,31 | 150,50 |

O dia 2 foi um dia predominantemente ensolarado, obtendo assim, um rendimento médio de 12,42%. A temperatura média do módulo com espelhos foi apenas 4,6 °C maior, com um pico de diferença de 12,9 °C. Em seu melhor ponto, a placa solar do sistema de automação criado chegou a gerar cerca 30% a mais.

4.4 DIA 3

Os dados de corrente são mostrados no Gráfico 4.5.

Gráfico 4.5 – Corrente em função do horário para o dia 3.



No dia 3 foram coletadas cerca de 5 horas de dados. O dia começou ensolarado com algumas nuvens, até ficar nublado a partir de 11:00h.

Nesse dia o módulo com espelhos teve um desempenho negativo em relação ao módulo sem espelhos no período da tarde, ou seja, rendimento negativo de -2,84 %. Das cerca de 5 horas de dados coletados, aproximadamente 2,5 horas dessas, foram de geração maior para o módulo com espelhos.

Às 11:43h teve-se o ponto de maior corrente em ambos módulos, sendo 168,49 mA e 153,85 mA nos módulos com e sem espelhos, respectivamente, rendimento superior de 9,51%. O ponto de maior rendimento, 16,7%, não ocorreu no momento das maiores correntes, sendo as correntes nesse ponto iguais a 157,79 mA e 135,22 mA.

O menor rendimento foi de -9,40%, às 15:02h, com correntes abaixo de 3 mA, momento de sombra intensa.

Pela manhã, no período de 8:00h até 12:00h, o rendimento médio foi de 5,38%, enquanto no período da tarde, 12:02h até 18:00h, este foi de -2,84%.

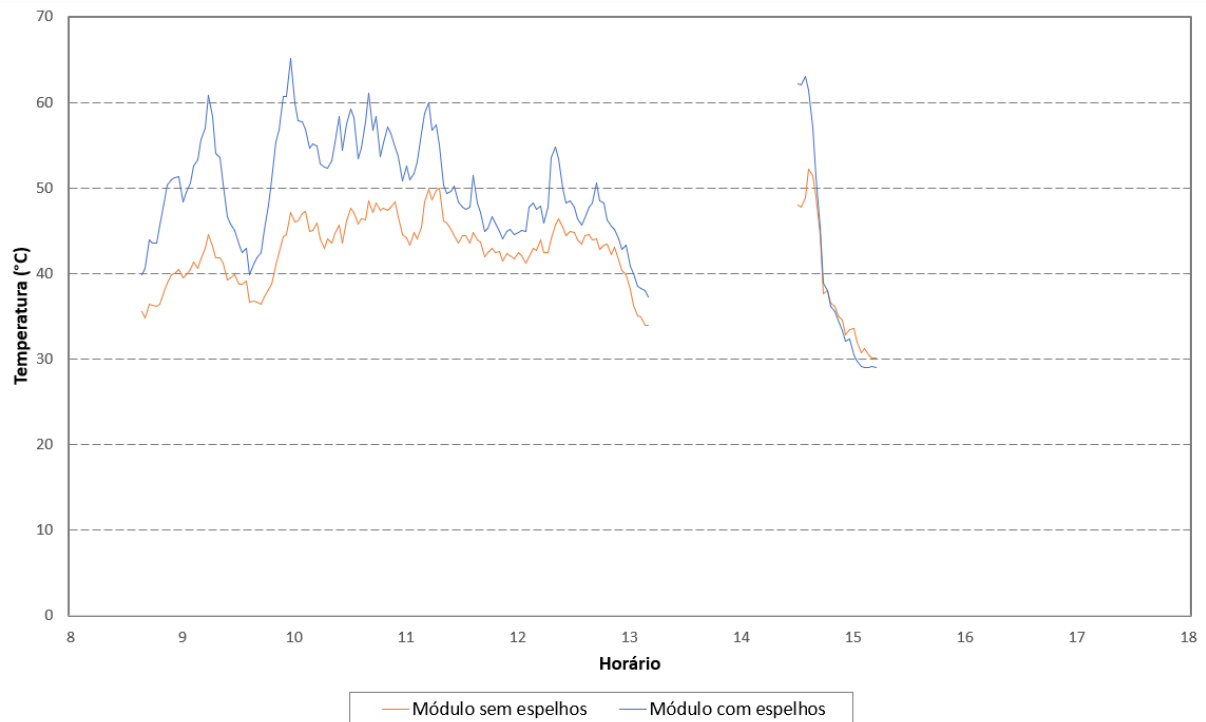
A Tabela 4.5 mostra dados referentes ao rendimento.

Tabela 4.5 – Rendimentos para o dia 3.

| Rendimento Médio (%) | Maior Rendimento (%) |
|----------------------|----------------------|
| 2,44 | 16,70 |

Os dados de temperatura são mostrados no Gráfico 4.6.

Gráfico 4 6 – Temperatura em função do horário para o dia 3.



As temperaturas no ponto de maior rendimento foram de 51 °C e 38 °C para os módulos com e sem espelhos, respectivamente, uma diferença de 13 °C. As temperaturas máximas foram de 65,1 °C e 52,2 °C, uma diferença de 12,9 °C, sendo este o ponto de maior diferença de temperaturas entre os módulos. A Tabela 4.6 mostra dados referentes à temperatura e corrente.

Tabela 4.6 – Temperaturas e correntes para o dia 3.

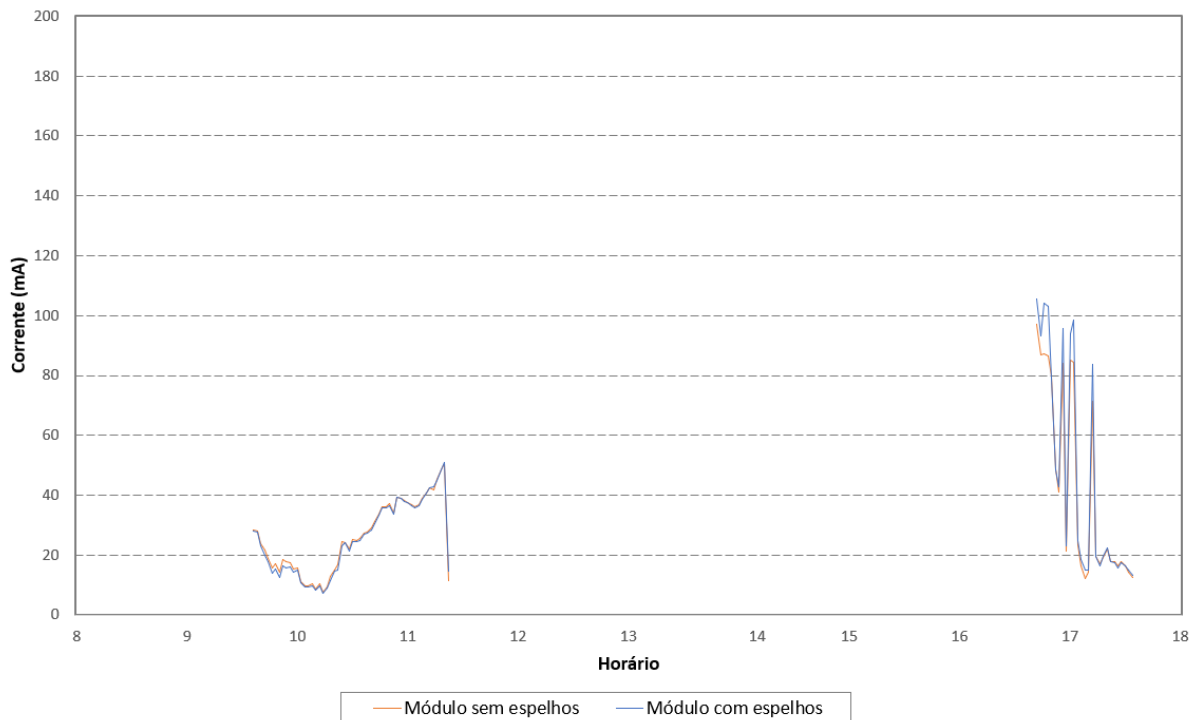
| | Temperatura Média (°C) | Corrente Máxima (mA) |
|-----------------------------|------------------------|----------------------|
| Módulo Com Espelhos: | 48,71 | 168,49 |
| Módulo Sem Espelhos: | 42,16 | 153,85 |

O dia 3 teve um rendimento médio baixo, de cerca de 2%. O rendimento pela manhã foi positivo enquanto à tarde foi negativo. Até as 11:00h tinha-se Sol sem nuvens, momento em que o módulo com espelho mostrou seu melhor rendimento e maior temperatura. Após esse horário, o rendimento ficou próximo de zero, ocorrendo um pico de corrente próximo das 11:30, com rendimento próximo de 10%. A temperatura no módulo com espelhos chegou a quase 70 °C, mas a diferença de temperaturas entre módulos não ultrapassou a casa dos 13 °C.

4.5 DIA 4

Os dados de corrente são mostrados no Gráfico 4.7.

Gráfico 4.7 – Corrente em função do horário para o dia 4.



No dia 4 foram coletadas cerca de 2,5 horas de dados, sendo este um dia predominantemente nublado.

Esse dia teve um rendimento médio praticamente nulo, 0,15%. Pela manhã o rendimento foi negativo e igual a -2,90%, enquanto à tarde este foi de 6,25%. Como foram coletados mais dados pela manhã, a média total tende para os valores desse período. Das 2,5 horas de dados, aproximadamente 1 hora foi composta de rendimentos positivos.

Às 16:48h ocorreu o ponto de maior corrente em ambos módulos, sendo 105,5 mA e 97,17 mA nos módulos com e sem espelhos, respectivamente, rendimento de 8,57%. O ponto de maior rendimento, 25,50%, não ocorreu no momento das maiores correntes, sendo as correntes nesse ponto iguais a 14,63 mA e 11,65 mA, ou seja, momento de sombra.

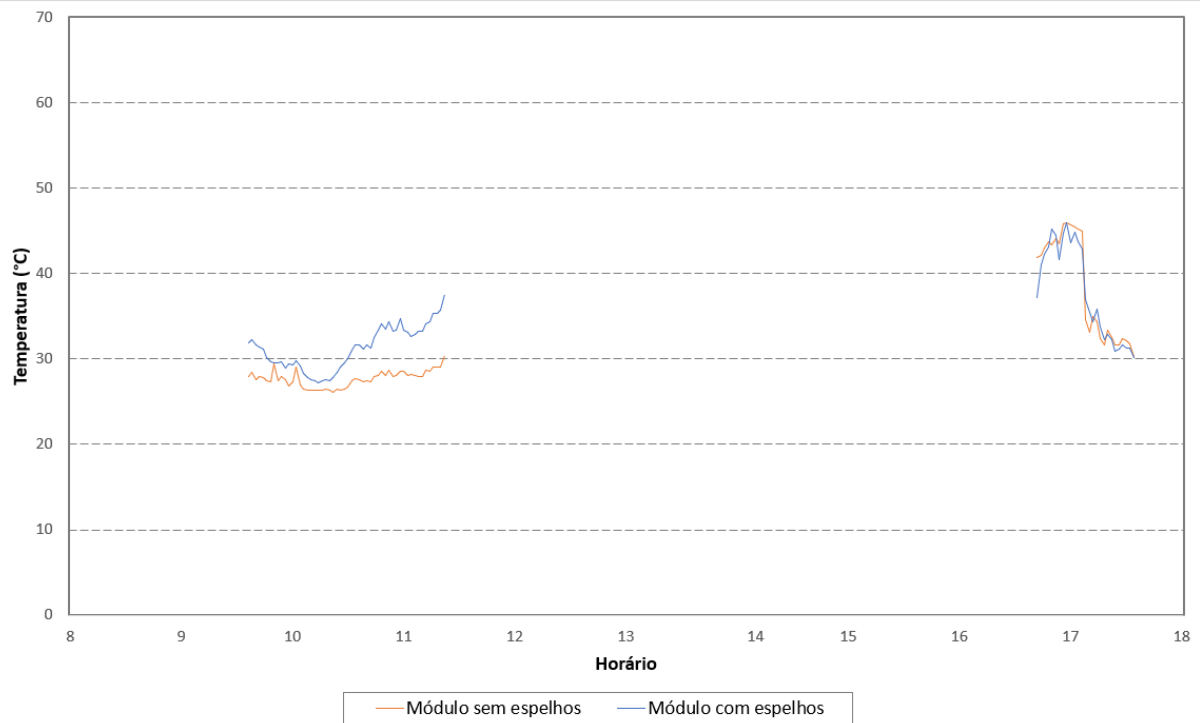
O menor rendimento foi de -11,84%, próximo das 10:00h, com correntes abaixo de 15 mA, momento de sombra intensa. A Tabela 1 mostra dados referentes ao rendimento.

Tabela 4.7 – Rendimentos para o *dia 4*.

| Rendimento Médio (%) | Maior Rendimento (%) |
|----------------------|----------------------|
| 0,15 | 25,50 |

Os dados de temperatura são mostrados no Gráfico 4.8.

Gráfico 4.8 – Temperatura em função do horário para o dia 4.



As temperaturas máximas foram de mesmo valor, 46 °C próximo das 17h para ambos os módulos, momento de correntes de cerca de 100 mA. À tarde, os valores de temperatura foram praticamente iguais, com valores médios de 37,80 °C e 38,20 °C, uma diferença ínfima de 0,4 °C, sendo o módulo sem espelhos o mais quente. Por outro lado, o módulo com espelhos no mesmo período gerou 6,25% a mais, com correntes variando entre 100 mA e 20 mA.

O maior rendimento ocorreu logo após a inicialização do sistema, no período da tarde. Pouco após, a corrente baixou substancialmente, ficando em média nos 40mA, ou seja, um período de pouca radiação incidente. A maior diferença de temperaturas foi de 9,20 °C, que ocorreu no período da manhã. A Tabela 4.8 mostra dados referentes à temperatura e corrente.

Tabela 4.8 – Temperaturas e correntes para o dia 4.

| | Temperatura Média (°C) | Corrente Máxima (mA) |
|-----------------------------|------------------------|----------------------|
| Módulo Com Espelhos: | 33,43 | 105,50 |
| Módulo Sem Espelhos: | 31,18 | 97,17 |

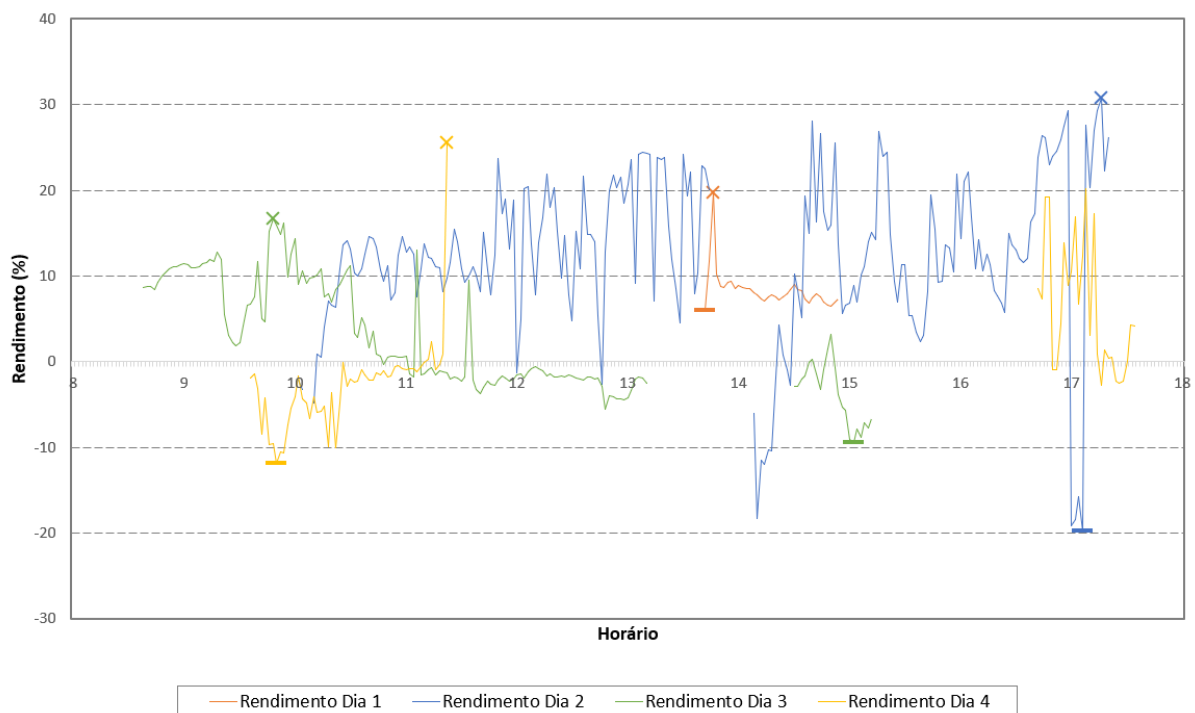
O dia 4 teve um rendimento praticamente nulo. Esse dia teve correntes médias em cerca de 30 mA, não sendo um dia ensolarado. A corrente máxima foi de cerca de 100 mA para ambos módulos, com temperaturas máximas iguais durante o dia. A baixa corrente em quase todo o dia deve-se à falta de Sol, acarretando dados de corrente praticamente idênticos, ou seja, nesse dia com sombras, as correntes foram praticamente iguais.

4.6 ANÁLISE ENTRE DIAS

Gráficos comparativos entre os dados dos quatro dias foram gerados a fim de facilitar a análise entre os diferentes dias. Primeiramente, foi feita uma análise sobre os rendimentos.

4.6.1 ANÁLISE DE RENDIMENTO

Gráfico 4.9 – Rendimentos de cada dia em função do horário.



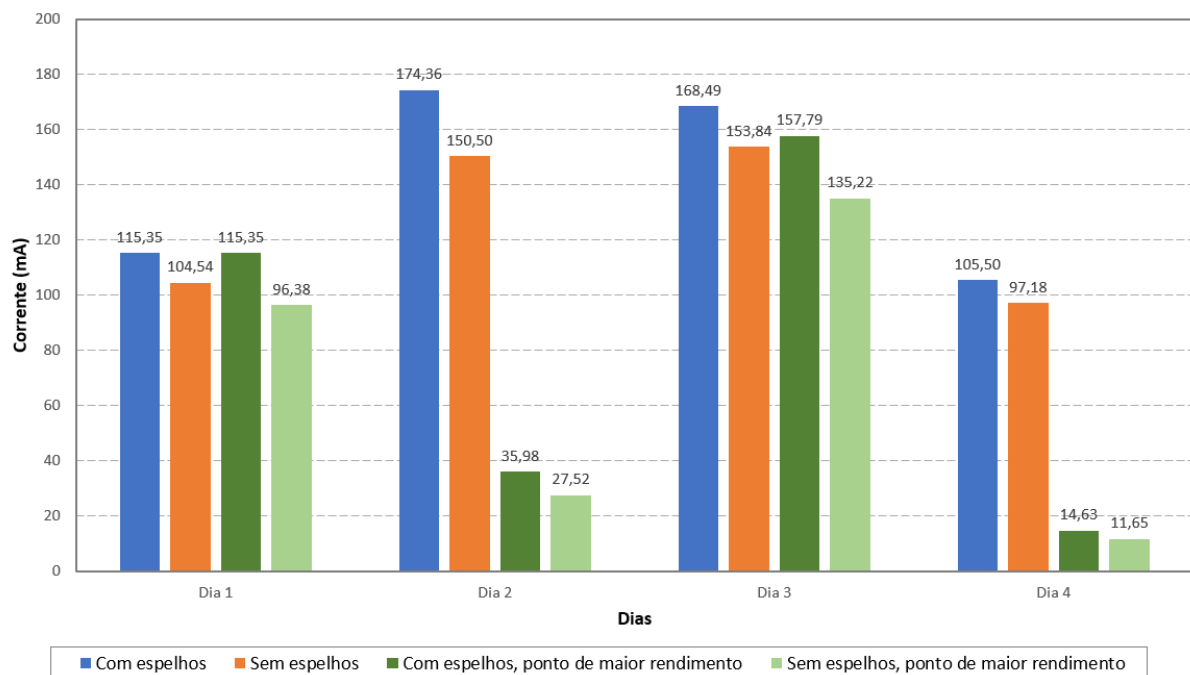
No Gráfico 4.9 é visível que a maior parte dos rendimentos foram positivos, mesmo considerando dias com certos horários de pouco Sol. Considerando a média de todos os dados colhidos em todos os dias, temos um valor de 5,84% de geração a mais entre a placas solares.

O dia 2, em azul, é o dia que se teve mais Sol por mais tempo. Nele, ocorreram os registros dos maiores rendimentos de todos os dias, passando do patamar de 20% em vários pontos e chegando a até 30%. Porém, é também o dia com o menor rendimento de todos, chegando a quase -20% em dois pontos no período da tarde. É importante ressaltar que esses pontos extremos são compostos por correntes baixas, cerca de 20 mA. Nota-se uma tendência crescente nesse dia.

O dia 1, em laranja, teve rendimento majoritariamente baixo, oscilando próximo de 10%, mas com um pico de cerca de 20%. Nota-se uma tendência decrescente nesse dia. O dia 3, em verde, teve um comportamento decrescente, começando o dia com um rendimento próximo dos 15% e gradualmente reduzindo até chegar em um mínimo de aproximadamente 10%. O dia 4 teve comportamento crescente pela manhã, com um pico de cerca de 25%.

4.6.2 ANÁLISE DE CORRENTE

Gráfico 4.10 – Correntes máximas para cada dia.



O Gráfico 4.10 mostra que nos dias 2 e 4 os pontos de maior rendimento não representam as maiores correntes, tendo, nesses dias, correntes abaixo dos 40 mA e 20 mA respectivamente. Correntes muito baixas significam que o Sol está bloqueado por nuvens,

sendo essa a situação em que a placa com espelhos teve maior geração comparativa com o módulo sem as superfícies refletoras para esses dois dias.

É visível que em todos os casos, o módulo com espelhos teve uma geração máxima superior ao módulo sem espelhos. Isso nos mostra que, se tem radiação direta incidente nas placas, ou seja, sem bloqueio do Sol por nuvens, a placa com espelhos sempre gera mais energia. Porém, esse ponto de máxima corrente não representa o ponto de melhor rendimento do sistema.

4.6.3 ANÁLISE DE TEMPERATURA

Gráfico 4.11 – Temperaturas máximas para cada dia.

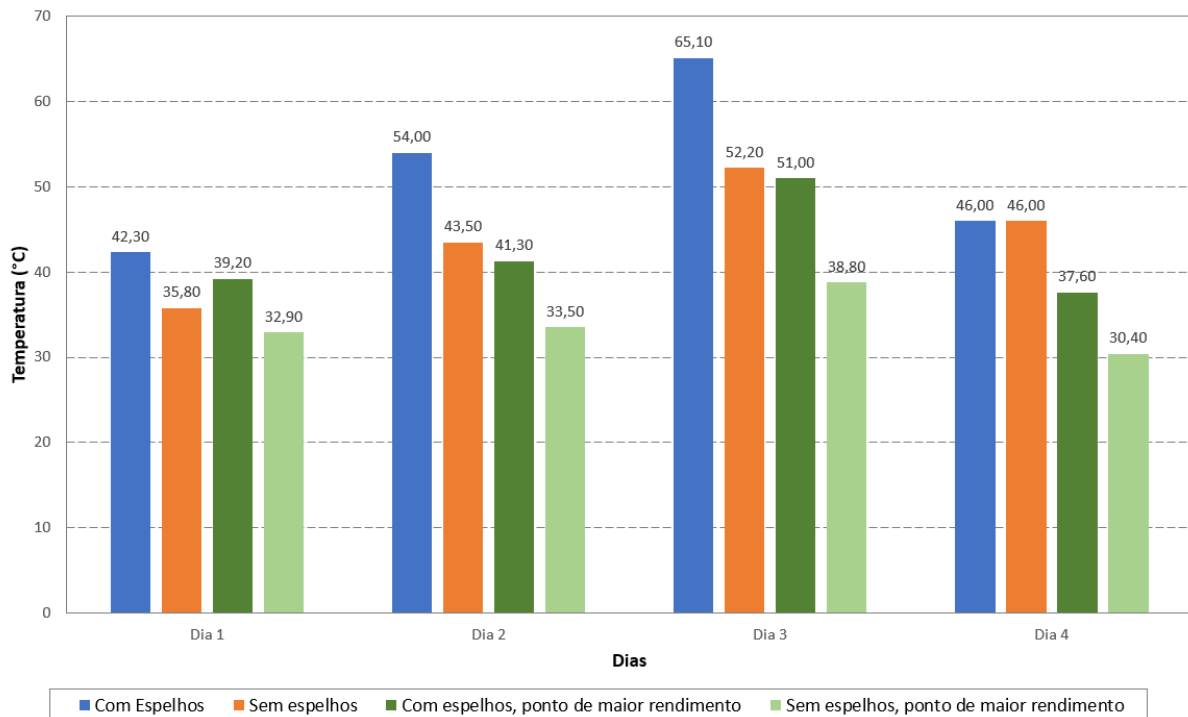
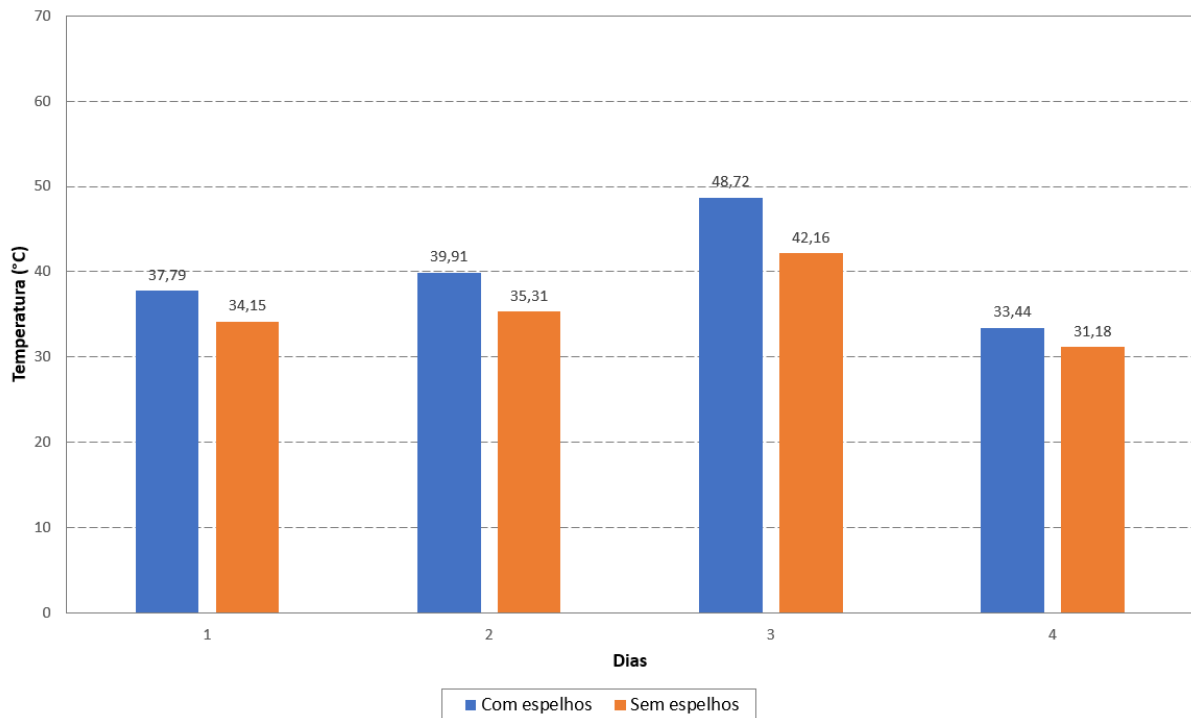


Gráfico 4.12 - Temperaturas médias para cada dia.



Como mostram os Gráficos 4.11 e 4.12, as temperaturas do painel com espelhos é sempre superior ao sem espelhos, seja esta máxima ou média durante os dias. A temperatura no módulo com espelhos chegou a cerca de 31% a mais no dia 3 em seu ponto de maior rendimento, sendo essa a maior diferença entre temperaturas de todos os casos.

Ocorreu no dia 3 a maior temperatura registrada, de 65 °C no módulo com espelhos, 25% maior que o módulo sem espelhos para esse mesmo dia. Como foram usadas placas de pequena potência e tamanho reduzido, a temperatura não foi um fator preocupante na geração energética dos módulos, ficando ambas sempre abaixo de 70 °C.

5. CONCLUSÃO

Foi construída uma estrutura física composta por quatro motores de passo para que fosse possível inclinar ambos os espelhos de forma a acompanhar o movimento Leste-Oeste do Sol durante o dia. A estrutura construída com os espelhos tem limitações de inclinação, com inclinação máxima de $82,5^\circ$ e mínima de $37,5^\circ$. Por essas limitações, o sistema construído é efetivo a partir das 9:30h até às 17:00h.

Foram coletadas cerca de 16 horas de dados, distribuídas entre quatro dias distintos e com diferentes condições climáticas. Esses dados foram coletados por meio da medida de corrente dos módulos, conectados a um resistor de $20,8 \Omega$. Para essa carga, os módulos operam na região em que a corrente gerada é linearmente proporcional à incidência solar.

O módulo que utilizou os espelhos gerou, em média, 5,84% a mais que o módulo de referência. No dia de maior radiação incidente direta, observou-se uma geração de 12,42% a mais, chegando em certos momentos a 30%. Ainda nesse dia, a máxima diferença de temperatura entre os módulos foi de 31%, onde o módulo com espelhos chegou a 54°C .

Verificou-se que, em momentos de pouca radiação incidente, o módulo com espelhos atingiu seus maiores rendimentos em certos dias. Quando foram geradas correntes abaixo de 25% da especificação de máxima potência do módulo, abaixo de 35 mA, observou-se geração de corrente de 25% a 30% acima do módulo de referência. Já quando a geração de corrente era significativa, mais de 70% da especificação de máxima potência, observou-se um rendimento mais moderado, variando entre 10% a 20% a mais para a placa com espelhos.

A temperatura máxima nos módulos foi de 65°C para o módulo com espelhos e 52°C para o módulo sem espelhos, em diferentes pontos de um mesmo dia. Para um mesmo ponto colhido, a diferença máxima de temperatura foi de 31% entre módulos, sendo o com espelhos o mais quente. Notou-se que, em média, a diferença de temperatura variou de 10% a 15%, sendo o módulo com espelhos praticamente sempre mais quente que o módulo de referência.

De forma geral, os resultados foram positivos, com ganhos significativos para o módulo com espelhos, cerca de 5% a mais de geração de corrente. Para uma análise mais robusta, recomenda-se como trabalhos futuros a utilização de módulos comerciais de alta eficiência e espelhos de tamanho apropriado para o módulo. Mecanismos de controle dos espelhos que

não tenham limitações de ângulo, para gerar uma reflexão mais apropriada durante o dia, também podem ser desenvolvidos. Além disso, uma estrutura com dois eixos de rotação, que consiga se ajustar a declinação solar, seria outra forma de se aumentar a geração energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VILLALVA, Marcello Gradella. Energia solar fotovoltaica conceitos e aplicações: Sistemas isolados e conectados à rede. [S.l.]: Érica/Saraiva, 2015. 224 p.
- [2] ANEEL. -. Energia Solar. [S.l.: s.n.], [200?]. - p. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar(3).pdf)>. Acesso em: 13 nov. 2018.
- [3] Efeito Fotovoltaico. Disponível em: <[http:// naturezadafisica.files.wordpress.com](http://naturezadafisica.files.wordpress.com)>. Acesso em: 01 nov. 2018.
- [4] LOPEZ, Ricardo Aldabó. Energia solar para a produção de eletricidade. São Paulo: Artliber Editora, 2012.
- [5] PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (Org.). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. 530 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/manual_de_engenharia_fv_2014.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2018.
- [6] SOLAR CHOICE STAFF. -. *Solar trackers*. Disponível em: <<https://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>>. Acesso em: 06 dez. 2018.
- [7] FRONTIN, Sergio de Oliveira et al. (Org.). Usina Fotovoltaica Jaíba Solar: Planejamento e Engenharia. 1. ed. Brasília: Teixeira Gráfica e Editora, 2017. 527 p.
- [8] GREEN RHINO ENERGY. -. *Concentrating Photovoltaics (CPV)*. 2016. Disponível em: <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_concentration.php>. Acesso em: 07 nov. 2018.
- [9] CORNELIUS, Richard Gonçalves et al. Otimização de sistemas de geração fotovoltaicos através da reflexão de espelhos. 2016. 2 p. Artigo (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, 2016. Disponível em: <<http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/download/18147/6975>>. Acesso em: 22 nov. 2018.
- [10] MONTEIRO, Marco Aurélio. Reflexão da luz: Espelhos - 412EE. [201?]. 17 p. Artigo (Doutorado em Física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, [201?]. Disponível em: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/15727/412_RT.pdf?sequence=42>. Acesso em: 15 nov. 2018.
- [11] HU INFINITO. -. -. Disponível em: <<http://www.huinfinito.com.br>>. Acesso em: 13 nov. 2018.
- [12] RCAA ATACADISTA. -. Espelho 25-18. Disponível em: <<http://www.rcaatacadista.com.br/produtos/espelhos/espelho-25x18-no-18/>>. Acesso em: 10 out. 2018.

- [13] FOSTER, Robert; GHASSEMI, Majid; COTA, Alma (Org.). Solar Energy: Renewable Energy and the Environment. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2009. 380 p.
- [14] PALZ, Wolfgang. Energia Solar e Fontes Alternativas. 3. ed. [S.l.]: Hemus, 2003. 360 p.
- [15] MASTERS, G M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. 1. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 676 p.
- [16] LENARDIC, Denis. Pvresources. 2016. Disponível em: <<http://www.pvresources.com>>. Acesso em: 05 nov. 2018.
- [17] Wheldom A. et al. Payback Times for Energy and Carbon Dioxide: Comparison of concentrating and Non-Concentrating PV Systems. Proc. of the 16th European PVSEC. Glasgow 2000; 2622-2625.
- [18] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 24, NO. 5, maio de 2009.
- [19] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Atlas da Energia Elétrica do Brasil. Brasília – DF, 2005. 2ª Edição.
- [20] BANDEIRA, F. P. M. O aproveitamento da energia solar no Brasil – situação e perspectivas. Brasília. Câmara dos Deputados. 2012.
- [21] PEREIRA, E. B; MARTINS, F.R.; ABREU, S. L. de; RÜTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: INPE, 2006.

ANEXO I

CÓDIGO PARA CONTROLE DE ESPELHOS E OBTENÇÃO DE DADOS

```
#include <Stepper.h> // Carrega a biblioteca para o controle dos motores
#include <DS1307.h> // Carrega a biblioteca do RTC (Real Time Clock) DS1307

DS1307 rtc(A4, A5); // Define os pinos a serem usados pelo RTC
Time t; // Cria a variável que recebe os valores de tempo do RTC

const int stepsPerRevolution = 500; // Define o número de passos a serem
dados para 1 volta completa nos eixos dos motores
Stepper myStepperOne(stepsPerRevolution, 7, 9, 8, 10); // Configura o
número de passos do motor 1 e seus pinos de entrada
Stepper myStepperTwo(stepsPerRevolution, 4, 5, 3, 6); // Configura o
número de passos do motor 2 e seus pinos de entrada

int minutosagora = 0, decremento = 6, vetorminutos[36], auxiliar = 1,
fracaminutosagora = 0, girosperdidos = 0, umavez = 0, umavez1 = 0; //
Variáveis auxiliares
double fracaoprimeirogiro = 540/15, min2 = 0; // Variáveis auxiliares, de
alta precisão
double distancia[18], altura[18], dn[18], dn1[18], voltas[36],total=0; //
Vetores auxiliares
double deg = 3.14159265359/180; // Variável para facilitar conversão de
radianos para graus
double tamanhoEixo = 2.7; // Define o diâmetro dos eixos dos motores, em
centímetros

void setup() {

    delay(5000); // Aguarda 5 segundos
    Serial.begin(9600); // Inicializa o monitor serial

    myStepperOne.setSpeed(60); // Define a velocidade de rotação do motor 1,
em 60 rpm
    myStepperTwo.setSpeed(60); // Define a velocidade de rotação do motor 2,
em 60 rpm

    //rtc.halt(false); // Inicializa o RTC, caso este esteja
desativado
    //rtc.setDOW(SATURDAY); // Define o dia da semana do RTC
    //rtc.setTime(02, 18, 00); // Define o horário do RTC
    //rtc.setDate(10, 11, 2018); // Define o dia, mês e ano do RTC

    vetorminutos[0]=540; // Define a hora em que será dado o primeiro giro;

    for (int i=0; i <= 16; i++){ // Calcula o número de giros a serem dados

        distancia[i] = pow(33+25*(cos(((deg)*(90-(3.75*i))))),2);
        altura[i] = pow(-2.2+25*(sin(((deg)*(90-(3.75*i))))),2);
        dn[i] = sqrt(altura[i]+distancia[i]);

    }

    for (int i=0; i <= 14; i++){ // Preenche no vetor as rotações dos motores
do espelho da esquerda, 15 rotações
```

```

    dn1[i] = dn[i+1]-dn[i];
    voltas[i] = dn1[i]/(tamanhoEixo);
    total = total+voltas[i];
}

for (int i=15; i <= 19; i++){ // Preenche no vetor as rotações dos
    espelhos parados, 75 minutos parado.

    voltas[i] = 0;
}

for (int i=20; i <= 34; i++){ //preenche no vetor as rotações dos motores
do espelho da direita, 15 rotações

    voltas[i] = voltas[i-decremento];
    decremento = decremento+2;
}

Serial.println(vetorminutos[0]);

for (int i =1; i<=34; i++){ // Preenche o vetor com todos os horários de
rotações

    vetorminutos[i]=vetorminutos[i-1]+15;
}

voltas[0]=0; // Define como zero o primeiro giro do motor 1
voltas[1]=0; // Define como zero o segundo giro do motor 1
voltas[33]=0; // Define como zero o penúltimo giro do motor 2
voltas[34]=0; // Define como zero o último giro do motor 2
total = 4.5631; // Define o somatório de giros de um motor
myStepperOne.step(2048*-total); // Gira espelho da direita totalmente
t = rtc.getTime(); // Pedir ao RTC os parâmetros de tempo
minutosagora = t.hour*60 + t.min; // Define o minuto atual
fracaminutosagora = (int) minutosagora/15;
girosperdidos = fracaminutosagora - fracaprimeirogiro; // Define o
numero de giros perdidos a depender do horário de inicialização

if (girosperdidos >= 0){ // Código para corrigir os giros perdidos dos
espelhos.

    if (girosperdidos<=19){ // Região em que só o espelho esquerda se moveu

        for(int i=0; i<=girosperdidos; i++){

            Serial.print("Giros Perdidos! Girando Espelho da Esquerda: ");
            Serial.println(voltas[i]);
            myStepperTwo.step(2048*voltas[i]);
        }
    }
}

if (girosperdidos>19 && girosperdidos<=34){ // Região em que o espelho
esquerda se moveu completamente e o da direita se moveu também

```

```

        Serial.print("Giros Perdidos! Girando Espelho da Esquerda Totalmente:
");
        Serial.println(total);
        myStepperTwo.step(2048*total); // Gira o espelho da esquerda
totalmente

        for(int i=20; i<=girosperdidos; i++){

            Serial.print("Giros Perdidos! Girando Espelho da Direita: ");
            Serial.println(voltas[i]);
            myStepperOne.step(2048*voltas[i]);

        }

    }

}

}

void loop() {

    t = rtc.getTime();
    minutosagora = t.hour*60 + t.min;
    min2 = minutosagora%2; // Define se o minuto atual é múltiplo de 2

    if (min2 == 0 && umavez!= minutosagora) { // Mostra os valores a cada 2
minutos

        Serial.print(tensao(0),4); // Mostra no monitor serial o valor de
tensão da placa com espelhos
        Serial.print(" ");
        Serial.print(tensao(1),4); // Mostra no monitor serial o valor de
tensão da placa sem espelhos
        Serial.print(" ");
        Serial.print(temperatura(2),1); // Mostra no monitor serial o valor de
temperatura da placa com espelhos
        Serial.print(" ");
        Serial.print(temperatura(3),1); // Mostra no monitor serial o valor de
temperatura da placa sem espelhos
        Serial.print(" ");
        Serial.println(minutosagora); // Mostra no monitor serial o minuto
atual do dia

        umavez=minutosagora; // Variável para que o código não execute mais de
uma vez em um mesmo minuto

    }

    for (int i=0; i <= 34; i++){ // Checa se deve-se girar os espelhos em
determinado minuto

        if (minutosagora==vetorminutos[i] && umavez1!= minutosagora){ // Gira o
espelho da esquerda nos horários adequados

            if (i<=19){
                Serial.print("Girando Espelho da Esquerda: ");
                Serial.println(voltas[i]);
                myStepperTwo.step(2048*voltas[i]);
                umavez1=minutosagora;
            }
        }
    }
}

```

```

    } else if (i>=20 && i<=34){ // Gira o espelho da direita nos horários
adequados

    Serial.print("Girando Espelho da Direita: ");
    Serial.println(voltas[i]);
    myStepperOne.step(2048*voltas[i]);
    umavez1=minutosagora;

    }

}

}

    if (minutosagora>1060 && auxiliar==1){ // Volta os espelhos para suas
posições originais após horário pre definido

    Serial.print("Finalizado! Girando Espelho da Esquerda para Posição
Original: ");
    myStepperTwo.step(2048*-total);
    auxiliar=0;

    }

    delay(1000);

}

double temperatura(int LM35){ // Função que retorna a temperatura

    double valor = (float(analogRead(LM35))*5/(1023))/0.01;
    for (int i=0; i<25;i++){
        valor = valor + (float(analogRead(LM35))*5/(1023))/0.01;
        delay(5);
    }

    valor = valor/25;
    return valor;

}

double tensao(int FV){ // Função que retorna a tensão

    double valor = (float(analogRead(FV))*5/(1023));
    for (int i=0; i<25;i++){
        valor = valor + (float(analogRead(FV))*5/(1023));
        delay(5);
    }

    valor = valor/25;
    return valor;

}

```